

Hazard u tunelogradnji

Rogutić, Sabina

Undergraduate thesis / Završni rad

2020

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Rijeka, Faculty of Civil Engineering / Sveučilište u Rijeci, Građevinski fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:157:738132>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-04-01**



image not found or type unknown

Repository / Repozitorij:

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Civil Engineering - FCERI Repository](#)



zir.nsk.hr



image not found or type unknown

**SVEUČILIŠTE U RIJECI
GRAĐEVINSKI FAKULTET**

Sabina Rogutić

Hazard u tunelogradnji

Završni rad

Rijeka, 2020.

**SVEUČILIŠTE U RIJECI
GRAĐEVINSKI FAKULTET**

Preddiplomski sveučilišni studij

Geotehničko inženjerstvo

**Sabina Rogutić
JMBAG: 0114030997**

Hazard u tunelogradnji

Završni rad

Rijeka, rujan 2020.

Naziv studija: **Sveučilišni preddiplomski studij Građevinarstvo**

Znanstveno područje: Tehničke znanosti

Znanstveno polje: Građevinarstvo

Znanstvena grana: Geotehnika

Tema završnog rada

**HAZARD U TUNELGRADNJI
TUNNELING HAZARD**

Kandidat: **SABINA ROGUTIĆ**

Kolegij: **GEOTEHNIČKO INŽENJERSTVO**

Završni rad broj: **20-P-17**

Zadatak:

U završnom radu će se prikazati glavni rizici povezani s gradnjom u stijenskoj masi iz perspektive izgradnje tunela. Nesigurnosti koje dovode do potencijalnog hazarda i rizika vezani su u prvom redu uz prirodu materijala i opseg poznavanja uvjeta na lokaciji, te opisivanje ponašanja stijenskog materijala empirijskim izrazima i numeričkim modelima. Obradit će se pitanja sigurnosti izvođača i korisnika tunela tijekom izgradnje i u eksploataciji te rizici povezani s troškovima izgradnje koji proizlaze iz svega spomenutog. Poseban osvrt dat će se na hazardne situacije u području krša.

Tema rada je uručena: 24. veljače 2020.

Mentorica:

doc. dr. sc. Sanja Dugonjić Jovančević,
dipl. ing. građ.

IZJAVA

Završni rad sam izradila samostalno, u suradnji s mentoricom uz poštivanje pozitivnih građevinskih propisa i znanstvenih dostignuća iz područja građevinarstva. Građevinski fakultet u Rijeci je nositelj prava intelektualnog vlasništva u odnosu na ovaj rad.

Sabina Rogutić

U Rijeci, 25. kolovoza 2020.

ZAHVALA

Zahvaljujem se mentorici doc. dr. sc. Sanji Dugonjić Jovančević na strpljenu, pomoći i vodstvu prilikom izrade ovog završnog rada.

Posebnu zahvalu dugujem svojoj obitelji i prijateljima koji su me podržavali i motivirali tijekom cijelog studija.

SAŽETAK

Završni rad “Hazrad u tunelogradnji” istražuje potencijalne rizike koji inženjerima tijekom gradnje tunela u stijenskoj masi mogu zadavati ozbiljne probleme. Nesigurnosti se vezuju uz prirodu materijala i opsega poznavanja uvjeta na lokaciji. Gradnju u krškom području potrebno je posebno razmotriti jer se u takvom području mogu pojaviti mnoge hazardne situacije. Opasnost od prodora vode i poplavlivanja tunela je velika jer se izgradnjom objekta ili iskopom materijala mijenjaju hidrogeološki uvjeti u podzemlju kao i smjer tečenja podzemne vode. Sama gradnja tunela izrazito je složena i zahtjevna stoga valja voditi računa o zdravlju i sigurnosti ljudi tijekom izgradnje i u eksploataciji podzemnih građevina. Rizici povezani s troškovima izgradnje javljaju se zbog ranije navedenih nesigurnosti pa je potrebno analizirati koji faktori mogu dovesti do prekoračenja troškova. Održiva gradnja tunela sve više se primjenjuje, a posebna pažnja pridodaje se recikliranim materijalima i energetske učinkovitosti.

Ključne riječi: tunelogradnja, hazrad, rizici, stijenska masa, sigurnost

ABSTRACT

The final work "Tunneling hazard" explores the potential risks that engineers with building tunnels in the rock mass can cause serious problems. Uncertainties are related to the nature of the material and the extent of knowledge of the conditions at the site. Construction in the Karst area should be considered separately, as many hazardous situations can occur in such an area. The risk of water breaching and flooding of tunnels is high because the construction of the object or the excavation of materials changes the hydrogeological conditions underground as well as the direction of groundwater flow. The construction of the tunnel itself is extremely complex and demanding, so it is necessary to take into account the health and safety of people during the construction and in the construction of underground buildings. The risks associated with construction costs arise due to the uncertainties mentioned above, so it is necessary to analyse which factors can lead to cost overruns. Sustainable tunnel construction is increasingly being applied, and special attention is paid to recycled materials and energy efficiency.

Keywords: tunnelling, hazard, risks, rock mass, safety

SADRŽAJ

1. UVOD	1
2. RIZICI POVEZANI S GRADNJOM U STIJENSKOJ MASI	3
2.1. Nesigurnosti vezane uz parametre materijala.....	3
2.2. Nesigurnosti vezane uz klasifikacijske sustave.....	4
2.3. Nesigurnosti vezane uz empirijske izraze	7
2.4. Nesigurnosti vezane uz modeliranje	11
3. OPASNOST OD POPLAVLJIVANJA U TUNELIMA.....	12
3.1. Podzemna voda	12
3.2. Hidrogeološke karakteristike stijene i tla	13
3.3. Vremenske nepogode	15
3.4. Zaštita tunela od vode	15
4. RIZICI TUNEOGRADNJE U KRŠU	17
4.1. Općenito o kršu	17
4.2. Pojava praznih kaverni.....	17
4.2.1. Tunel Učka	17
4.2.2. Tunel hidrocentrale Velebit.....	18
4.2.3. Tunel Vrata.....	19
4.3. Pojava speleoloških objekata ispunjenih tlom i kršjem.....	19
4.3.1. Tunel Lučice.....	19
4.3.2. Tunel Brinje.....	20
4.4. Pojava zone loše stijenske mase.....	21
4.4.1. Tunel Javorova Kosa.....	21
4.4.2. Tunel Sveti Kuzam.....	21
4.5. Ispadanje blokova iz kaverne u kaloti tunela	22
4.6. Bubrenje mekanih stijena	23
5. ZDRAVLJE I SIGURNOST U PODZEMLJU.....	24
5.1. Podzemno inženjerstvo i ljudski faktor	25
5.2. Regulacija i upravljanje pitanjem sigurnosti	25
5.3. Opasnosti za zdravlje ljudi	27
5.4. Sigurnost od nasilja	32
6. MINIMALNI SIGURNOSNI GRAĐEVINSKI ZAHTEVI ZA CESTOVNE TUNELE.....	34
7. RIZIK OD POVEĆANJA TROŠKOVA	36
7.1. Ekonomska korist i troškovi.....	36
7.2. Faktori troškova tunelogradnje.....	38

8. TUNELGRADNJA I ODRŽIVI RAZVOJ	40
8.1. Održivost	40
8.2. Reciklirani materijali i energetska učinkovitost	40
8.3. Gospodarenje građevinskim otpadom	41
9. ZAKLJUČAK	43

POPIS TABLICA

Tablica 1: Kategorija stijenske mase prema RMR klasifikaciji [5]

Tablica 2: Kategorizacija stijenske mase prema Q klasifikaciji [6]

Tablica 3: Maksimalna dopuštena koncentracija zagađivača [20]

POPIS SLIKA

Slika 1: Stijenska masa [2]	3
Slika 2: Primjer izračuna RQD indeksa [4]	5
Slika 3: Primjena Hoek-Brownova kriterija [7]	8
Slika 4: Primjer modeliranja tunela u GEO5-MKE-Tunel softveru [8]	11
Slika 5: Podizanje vode prilikom iskopa [10]	12
Slika 6: Bušenje tunela "nizbrdo" i "uzbrdo" [10].....	13
Slika 7: Osnovna hidrogeološka karta Republike Hrvatske - list Zagreb [11].....	14
Slika 8: Različita geološka građa i kretanje vode [10]	14
Slika 9: Skica sanacije kaverne u tunelu Učka [16]	18
Slika 10: Skica kaverne na trasi tunela Velebit [17]	18
Slika 11: Skica sanacije svoda kaverne i mosta u tunelu Vrata [18].....	19
Slika 12: Skica urušavanja tunela Lučice [15]	20
Slika 13: Skica urušavanja tunela Brinje [15]	20
Slika 14: Urušavanje tunela Javorova Kosa [15]	21
Slika 15: Skica urušavanja tunela Sveti Kuzam [15]	22
Slika 16: Ispadanje bloka iz kaverne u kaloti tunela Sv.Rok [15].....	22
Slika 17: Izdizanje poda u tunelu [19].....	23
Slika 18: Uzdužna ventilacija tunela i koncentracija zagađivača [22]	28
Slika 19: Poprečna ventilacija tunela i koncentracija zagađivača [22]	28
Slika 20: Polupoprečna ventilacija tunela i koncentracija zagađivača [22]	28
Slika 21: Shematski prikaz uzdužne ventilacije sa impulsnim aksijalnim ventilatorima [23]	29
Slika 22: Ventilacija u tunelu Mala Kapela [24]	29
Slika 23: Stratifikacija dima [23]	30
Slika 24: Kritična brzina [23].....	31
Slika 25: Povratno strujanje dima [26].....	31
Slika 26: Probno paljenje u tunelu Sveti Rok [27]	32
Slika 27: Izlaz za slučaj nužde u tunelu [28].....	34
Slika 28: Znak opasnosti od naleta na dolazeće vozilo [21]	35
Slika 29: Prometni znak "izlaz u slučaju opasnosti" [21].....	35
Slika 30: Troškovi miniranja i obziđa za 6 metara promjera tunela Washingtonskog metroa u periodu od 1969. do 1994. godine [13]	36

Slika 31: Promjena troškova cestovnih tunela na temelju podataka iz Australije, Francuske, Japana, Švedske i SAD [13]	37
Slika 32: Ukupna cijena u funkciji metode plaćanja za podzemne konstrukcije [3].....	38
Slika 33: Faktori koji utječu na cijenu i njihov utjecaj [3]	39
Slika 34: Led rasvjeta tunela [30].....	41

1.UVOD

Pojam hazard označava vjerojatnost pojavljivanja potencijalno štetnih prirodnih pojava ili pojava uzrokovanih nekom ljudskom djelatnošću unutar određenog vremenskog perioda i unutar nekog prostora. Nemoguće je u potpunosti ukloniti sve hazarde, ali je potrebno eliminirati rizike i potencijalne razloge zbog kojih se oni javljaju. Tunelogradnja kao jedan od najizazovnijih građevinskih zahvata zahtjeva posebnu pažnju i skrb svih srodnih struka koje djeluju na tom području građevine. Sinergija svi sudionika gradnje ključna je za uspješnost projekta tunela.

Inženjeri se susreću s brojnim problemima čak i prije nego što gradnja tunela započne, a prvi od njih je materijal. Dolaskom na lokaciju buduće građevine potrebno je inženjerskogeološkim istraživanjem odrediti značajke materijala. Potom u fokus dolaze laboratorijska ispitivanja materijala koja sa sobom nose i određene nesigurnosti jer se nikad s točnošću ne može ponašanje tla ili stijenske mase opisati ispitivanjem jednog ili više točkastih uzoraka. Rizici se vezuju i uz klasifikacijske sustave, empirijske izraze ili odabrane parametre, a samo male promjene donose bitno drugačije ponašanje materijala od očekivanog.

Osim materijala probleme mogu uzrokovati i poplave tj. prodori podzemne vode tijekom iskopa ili tijekom eksploatacije objekta, ali u svakom trenu one predstavljaju dodatna naprezanja i samim time moguće posljedice. Kada govorimo o podzemnim objektima svakako se zdravlje i sigurnost korisnika protežu kao vrlo važni faktori. Opasni plinovi, dim i temperatura od požara te neadekvatna ventilacija samo su neki od problema koji se mogu javiti u podzemlju. Stoga je prilikom projektiranja i građenja tunela potrebno voditi računa o sigurnosti ljudi i opreme da bi se mogući hazardi sveli na minimum. Rizik od povećanja troškova ono je što najčešće brine sve sudionike gradnje, a nemalo je slučajeva kada troškovi tunela i dvostruko premaše očekivane budžete kao što je bio slučaj kod gradnje tunela Učka. Samo uz temeljitu analizu svih faktora i eliminacijom potencijalnih rizika moguće je zadržati troškove u okvirima prihvatljivog.

Tunelogradnja u kršu izrazito je zahtjevna kao i problemi koji se pri izvođenju u takvom području javljaju, od pojave praznih kaverni i speleoloških objekata do ispadanja blokova iz kaverne u kaloti tunela. Različiti slučajevi iz prakse daju građevinarima širu sliku o složenosti izvođenja podzemnih objekata na ovakvim lokacijama.

Za kraj, potrebno je spomenuti i održivu gradnju tunela koja se sve više spominje. Razlog tomu je edukacija ljudi kada je u pitanju zaštita okoliša i sve veća svjesnost kako je održiva gradnja budućnost globalnog sustava čiju cjelinu i sami činimo.

2. RIZICI POVEZANI S GRADNjom U STIJENSKOJ MASI

2.1. Nesigurnosti vezane uz parametre materijala

Izgradnja tunela zahtijeva brojna znanja i iskustva iz tog područja kao i zajednički rad srodnih struka. Izborom trase nekog tunela prvi problem koji se javlja je onaj kako znati u kakvom materijalu se gradi. Tunel karakterizira relativno mali poprečni presjek s obzirom na ukupnu duljinu stoga ne čudi kako će se prilikom gradnje ovakve vrste objekta naići na različite materijale koji shodno tome imaju i sasvim različita ponašanja. Podzemne građevine mogu se izvoditi u tlu ili u stijeni čije karakteristike valja bitno razlikovati, ali se tuneli uglavnom grade u stijenskoj masi stoga je naglasak stavljen na rizike koje gradnja u takvom materijalu donosi. Uspješno projektiranje i građenje tunela zahtijeva dobru prognozu svojstava tla i stijena temeljenu na geotehničkim istražnim radovima koji započinju u vrlo ranoj fazi projekta.

Stijenska masa koja se javlja u prirodi je heterogena, anizotropna, raspucala i prirodno napregnuta, a uključuje intaktnu stijenu i strukturne diskontinuitete kao što je prikazano na slici 1. [1]



Slika 1: Stijenska masa [2]

U rješavanju inženjerskih problema stvarni izazov predstavlja određivanje i usvajanje parametara čvrstoće stijenske mase velikih razmjera. S obzirom na veličinu promatranog uzorka stijenske mase i njezine parametre čvrstoće, postoji niz različitih metoda za određivanje čvrstoće. Potrebno je promatrati uzorke diskontinuiteta, stijenske mase i intaktne stijene i njihove pripadajuće karakteristike koji utječu na posmičnu čvrstoću. Valja naglasiti kako promatrani uzorci ne mogu opisati točno stanje na terenu stoga i pri određivanju i usvajanju parametara u obzir treba uzeti i nesigurnosti koje se za njih vežu.[1]

Jedan od problema vezanih uz prirodu materijala u kojem se grade tuneli je njegova heterogenost. Prilikom gradnje se može naići na značajke materijala koje se znatno razlikuju od usvojenih parametara. Moguće je naići na rasjedne zone oslabljenih značajki, kaverne ispunjene materijalom slabijih značajki ili vodom koja može uzrokovati druge probleme. Stoga je ovim pitanjima nesigurnosti vezanih uz materijale moguće doskočiti korištenjem metode opažanja u tunelogradnji. Metodom opažanja se uspoređuju značajke i deformacije predviđene inicijalnim projektom sa stvarnim ponašanjem materijala na terenu. Mjerenjima se potvrđuje predviđeno ponašanje ili utvrđuje odstupanje koje zahtijeva daljnje mjere stabilizacije. Eurocode 7 preporučuje korištenje metode opažanja za sve zahtjevnije situacije u kojima je predviđanje ponašanja materijala otežano.

Prilikom gradnje plitkog tunela (malog nadsloja) u slaboj stijenskoj masi postoji rizik urušavanja tunela do površine terena. Važno je znati da se u ovakvom slučaju ne primjenjuju uobičajene metode interekcije stijene i podgrade. U slaboj stijenskoj masi nerjetko je problem stabilnosti čela iskopa koji se može rješavati višefaznim iskopom, iskopom pod zaštitom prethodno ugrađenog kišobrana ili privremenim armiranjem čela sidrima. Primjeri ovih situacija sloma u stijenskoj masi bit će prikazan dalje u radu.

Uvjeti tla i geološko stanje terena ulazi su parametri u projektiranju tunela, a o njima ovisi metoda iskopa i potrebna stabilizacija. Točno predviđanje geoloških problema u početku projekta važno je za optimizaciju troškova te za smanjenje pojava neočekivanih podzemnih uvjeta koji predstavljaju glavni rizik i mogu prouzročiti kašnjenje u procesu izgradnje, promjene metode iskopa i razne druge poteškoće. Geološki i hidrološki uvjeti na otvorenom kraju tunela utječu i na složenost projekta portala što može imati utjecaj i do 25% na ukupnu cijenu. [3]

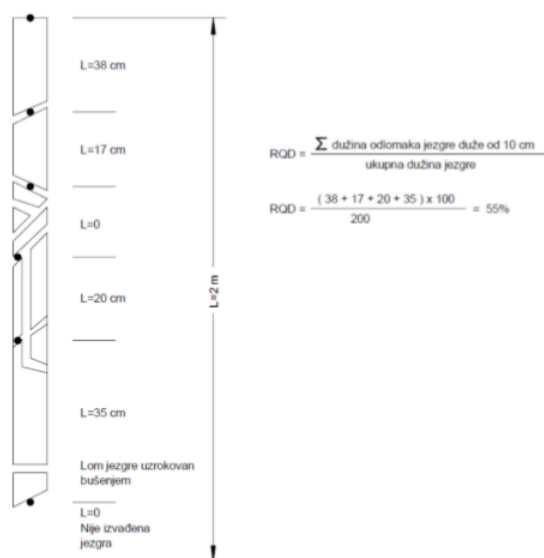
2.2. Nesigurnosti vezane uz klasifikacijske sustave

Klasifikacija stijenske mase predstavlja postupak grupiranja stijenske mase na osnovi međusobnih odnosa njezinih značajki. Većina novih klasifikacijskih sustava razvijena je na osnovi iskustva inženjera tijekom gradnje u stijenskoj masi, a uključeni su utjecaji rastrošenosti stijenske mase i podzemne vode. Nesigurnosti se javljaju jer svaka klasifikacija nije primjenjiva za svaku vrstu stijenske mase, već je potrebno provjeriti odgovara li određena klasifikacija vrsti stijene na kojoj se primjenjuje. Također, brojni parametri unutar klasifikacijskih sustava ovisni su o subjektivnoj procjeni i iskustvu inženjerskog geologa. Sedam najčešće korištenih klasifikacija i njihovi nedostaci nabrojani su u nastavku.[1]

Terzaghijeva klasifikacija stijenske mase je prva metoda razvijena na osnovi mogućeg opterećenja stijenske mase koje se prihvaća ugradnjom podgrade od čeličnih lukova. Tijekom 50-ih godina prošlog stoljeća ovaj klasifikacijski sustav je bio dominantan u SAD-u u tunelogradnji, međutim zaključeno je kako ova klasifikacija previše generalizira objektivno stanje kvalitete stijenske mase. Kvantitativna informacija o značajkama stijenske mase zanemarena je u ovom sustavu. Bez obzira na navedene nedostatke, Terzaghijeva klasifikacija ipak doprinosi opisu pojedinih značajki stijenske mase u uvjetima gdje geostatička naprezanja imaju presudan utjecaj.[1]

Laufferova klasifikacija stijenske mase predlaže suodnos između vremena postojanosti stijenskog iskopa nepodgrađenog raspona i različitih klasa stijenske mase. Orijehtacija osi tunela u odnosu na strukturni sklop stijenske mase, nagib u poprečnim presjecima, metoda iskopa, metoda podgrađivanja i brojni drugi faktori utječu na predloženu korelaciju.[1]

Rock Quality Designation klasifikacija (RQD) razvijena je kao pokazatelj kvalitete stijenske mase. RQD indeks definira se kao postotak intaktne jezgre koja sadrži odlomke dužine 1 m ili duže u ukupnoj dužini izbušene jezgre (slika 2.). Indeks se koristi kao standardni parametar u logovima i formama istražnih bušotina te kao jedan od osnovnih elemenata RMR i Q klasifikacije stijenske mase. RQD je jednostavna i relativno jeftina metoda određivanja kvalitete stijenske mase međutim nedovoljna za prikladan opis stijenske mase. [1]



Slika 2: Primjer izračuna RQD indeksa [4]

Rock Structure Rating klasifikacija (RSR) predstavlja prvi cjelovit sustav klasifikacije stijenske mase koji daje kvantitativnu metodu opisa kvalitete stijenske mase i odabira potrebnog podgradnog sustava u koji je svrstan i mlazni beton. Glavna značajka ovog sustava je bodovanje stijenske mase prema geološkim parametrima i parametrima podgradne konstrukcije, a ukupna suma RSR bodova je maksimalno 100. Danas se ova metoda rijetko koristi iako je tijekom svoje primjene korištena na velikom broju izvedenih tunela. Nažalost definicije pojedinih parametara koji se koriste pri klasifikaciji nisu jasno određene te se ne koriste uobičajeni standardni opisi pukotinskih sustava što može rezultirati zabunama u odabiru primjerenih parametara. [1]

Geomehanička klasifikacija (RMR) mijenjana je tijekom godina na osnovi rezultata primjene i provjere na podzemnim građevinama te prilagođavana međunarodnim standardima i procedurama. Zadnja inačica iz 1989. godine zasniva se na određivanju šest parametara, a to su: jednoosna čvrstoća stijenskog materijala, RQD indeks, razmak diskontinuiteta, stanje diskontinuiteta, uvjeti podzemne vode i orijentacija diskontinuiteta. Stijenska masa dijeli se u pojedinačne strukturne regije koje se klasificiraju odvojeno. Dodijeljene vrijednosti parametara se zbrajaju i ukupna suma daje RMR vrijednost na temelju koje se stijenska masa dijeli u pet kategorija prikazanih u tablici 1. Glavni nedostatak ove klasifikacije je osjetljivosti sustava na male varijacije u kvaliteti stijenske mase koji značajno utječu na promjenu vrijednosti i mogu odrediti bitno drugačiji tip podgradne konstrukcije. Uz to, klasifikacija ne usvaja nove sustave ojačanja. [1]

Tablica 1: Kategorija stijenske mase prema RMR klasifikaciji [5]

Broj bodova (RMR)	Kategorija stijenske mase	Prosječno vrijeme stabilnosti nepodgrađenog otvora	Približne vrijednosti čvrstoće stijenske mase na smicanje	
			c (Kpa)	θ (°)
100-81	I. Vrlo dobra	20 godina za raspon 15 m	>400	>45
80-61	II. Dobra	1 godina za raspon 10 m	300-400	35-45
60-41	III. Povoljna	1 tjedan za raspon 5 m	200-300	25-35
40-21	IV. Slaba	10 sati za raspon 2,5 m	100-200	15-25
<21	V. Vrlo slaba	30 minuta za raspon 1 m	<100	<15

Q klasifikacija stijenske mase sastoji se od numeričke procjene kvalitete stijenske mase pomoću RQD indeksa, broja skupova pukotina, indeksa hrapavosti pukotina, indeksa aliteracije pukotina, faktora pukotinske vode i faktora redukcije naprezanja. Važno je u obzir

uzeti sve faktore koji utječu na nabrojane parametre te ih pažljivo vrednovati pomoću danih klasifikacija. Pomoću dobivenog Q indeksa stijenska masa se dijeli u devet kategorija kao i podgradne konstrukcije (tablica 2). [1]

Tablica 2: Kategorizacija stijenske mase prema Q klasifikaciji [6]

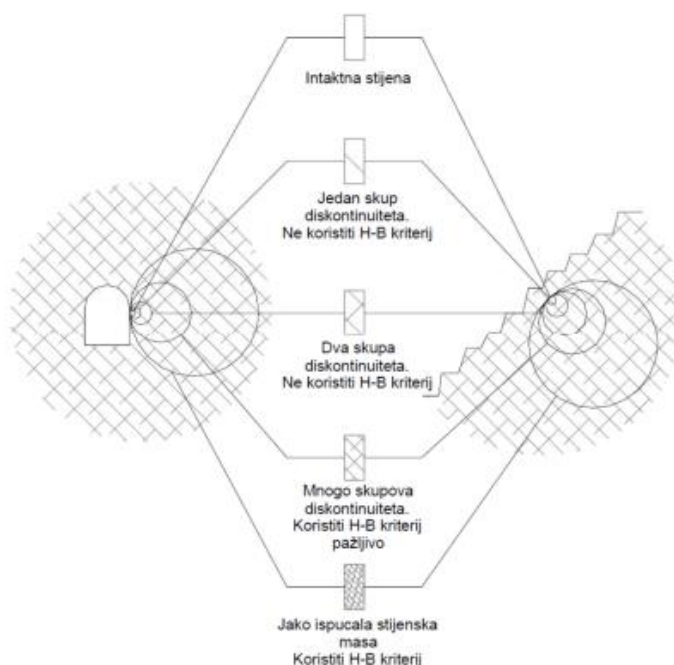
Q	Kategorija stijenske mase
0.001 - 0.01	Krajnje slaba
0.01 - 0.1	Iznimno slaba
0.1 - 1.0	Vrlo slaba
1.0 - 4.0	Slaba
4.0 - 10.0	Povoljna
10.0 - 40.0	Dobra
40.0 - 100.0	Vrlo dobra
100.0 - 400.0	Iznimno dobra
400.0 - 1000.0	Krajnje dobra

Klasifikacijski sustav koji je najpodložniji subjektivnoj procjeni koja prolazi između ostalog iz iskustva procjenitelja je Geological Strength Indeks (GSI) klasifikacija. Zasnovana je na pretpostavci da stijenska masa sadrži dovoljan broj slučajno orijentiranih diskontinuitet pa se može smatrati izotropnom. Ne može se koristiti kada je jasno definirana dominantna strukturalna orijentacija stijenske mase, a neprimjereno je i određivanje GSI vrijednosti na licu iskopa u čvrstoj stijeni s nekoliko diskontinuiteta na razmacima sličnim dimenzijama tunela ili kosine. Kvantitativan inženjerskogeološki opis stijenske mase suština je GSI klasifikacije čiji je GSI indeks zasnovan na procjeni litologije, struke i uvjeta površine diskontinuiteta u stijenskoj masi. Indeks se određuje vizualnim ispitivanjem stijenske mase vidljive u zasjecima, u površinskim iskopima poput zasjeka za ceste, lica tunela i jezgre bušotina. Funkcija GSI sustava je određivanje značajki stijenske mase kombinacijom dva osnovna geološka procesa, blokovitost stijenske mase i uvjeti diskontinuiteta, uvažavajući glavna geološka ograničenja koja određuju formaciju. [1]

2.3. Nesigurnosti vezane uz empirijske izraze

Za opisivanje parametara čvrstoće pri rješavanju inženjerskih problema u stijenskoj masi većinom se koristi Hoek-Brownov (empirijski) kriterij sloma koji je prošao dugogodišnji razvoj do današnjeg općeg oblika. Kriterij je moguće primijeniti ili u intaktnoj

stijeni ili u znatno raspucaljoj stijenskoj masi što je i prikazano na slici 3, pri čemu je moguće usvojiti da se obje sredine ponašaju homogeno i izotropno. Kada je veličina blokova stijenske mase veličine građevine ili kada je pojedini sustav diskontinuiteta znatno slabiji od ostalih, Hoek-Brownov kriterij nije moguće koristiti ili se koristiti uz znatan oprez. [1]



Slika 3: Primjena Hoek-Brownova kriterija [7]

Originalni Hoek-Brownov kriterij čvrstoće stijenske mase predložen je 1980. godine temeljen na podacima troosnog ispitivanja stijenske mase čiji empirijski izraz (1) glasi

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sqrt{m\sigma_3\sigma_c + s\sigma_c^2} \quad (1)$$

gdje su:

m, s -konstante ovisne o karakteristikama stijenske mase,

σ_c – jednoosna tlačna čvrstoća intaktne stijene,

σ_1 – veće glavno naprezanje pri slomu,

σ_3 – manje glavno naprezanje pri slomu.

Hoek E. i Brown E.T., autori ovog kriterija bili su najbliži ponašanjima stijenske mase kod izvedbe podzemnih otvora stoga je kriterij u odnosima glavnih naprezanja. Problem se

pojavlja kod primjene kriterija za rješavanje drugih inženjerskih problema poput analiza stabilnosti kosina gdje je posmična čvrstoća u funkciji normalnih naprezanja na plohi sloma. U slučaju kada imamo intaktnu stijenu vrijedi da je $s = 1$ i $m = m_i$, a vrijednost m_i odredi se iz troosnog ispitivanja stijene pri različitim naprezanjima ili iz rezultata ispitivanja. Za raspucanu stijensku masu vrijedi da je $0 \leq s < 1$ i $m < m_i$, a vrijednosti svakog od parametara teško je odrediti bez provedenih troosnih ispitivanja koja nisu primjenjiva u većini analiza. [1]

Unaprijeđeni Hoek-Brownov kriterij čvrstoće stijenske mase razlikuje se od originalnog zbog uvođenja efektivnih naprezanja, načina određivanja vrijednosti parametara s i m te tehnike određivanja ekvivalentnih vrijednosti kohezije c i kuta unutarnjeg trenja θ . Na većem broju primjera iz prakse originalni kriterij se pokazao prekonzervativnim stoga su predložene kategorije poremećene i neporemećene stijenske mase i empirijske korelacije parametara m i s za svaku kategoriju zasebno.

Poremećena stijenska masa:

$$m = m_i * e^{\frac{RMR-100}{14}} \quad (2)$$

$$s = e^{\frac{RMR-100}{6}} \quad (3)$$

Neporemećena stijenska masa:

$$m = m_i * e^{\frac{RMR-100}{28}} \quad (4)$$

$$s = e^{\frac{RMR-100}{9}} \quad (5)$$

Svakako je potrebno kritički razmotriti dobivene vrijednosti pri primjeni kriterija za analize stabilnosti pokosa, gdje je stijenska masa poremećena i oslabljena zbog iskopa, te kod podzemnih iskopa u kojima je stijenska masa oslabljena uslijed miniranja. Prilikom određivanja parametara m i s usvajaju se suhi uvjeti stijenske mase, a u obzir se ne uzima utjecaj orijentacije pukotina. [1]

Modificirani Hoek-Brownov kriterij čvrstoće stijenske mase počeo se primjenjivati nakon što je ustanovljeno da originalni kriterij za raspucanu stijensku masu daje prihvatljive vrijednosti čvrstoće samo u slučaju kada manje glavno naprezanje dosegne značajne vrijednosti. Za male vrijednosti glavnih naprezanja dobivane su previsoke vrijednosti osne tlačne i vlačne čvrstoće, a modificirani kriterij uvjetuje da je vlačna čvrstoća jednaka nuli i glasi:

$$\sigma_1' = \sigma_3' + \sigma_c' \left(m_b * \frac{\sigma_3'}{\sigma_c} \right)^a \quad (6)$$

gdje je:

m_b – vrijednost konstante m za raspucanu stijenu,

a – konstanta ovisna o karakteristikama raspucane stijenske mase,

σ_c – jednoosna tlačna čvrstoća intaktne stijene,

σ_1' – veće glavno naprezanje pri slomu,

σ_3' – manje glavno naprezanje pri slomu.

Također dana je i tablica za procjenu vrijednosti m_b/m_i i a na osnovi strukture stijenske mase i uvjeta površine stjenki diskontinuiteta. [1]

Opći oblik Hoek-Brownova kriterija čvrstoće stijenske mase dan je izrazom (7):

$$\sigma_1' = \sigma_3' + \sigma_c' \left(m_b * \frac{\sigma_3'}{\sigma_c} + s \right)^a \quad (7)$$

gdje je:

σ_1' – veće efektivno glavno naprezanje pri slomu,

σ_3' – manje efektivno glavno naprezanje pri slomu,

m_b – vrijednost konstante m za stijensku masu,

σ_c – jednoosna tlačna čvrstoća intaktne stijene,

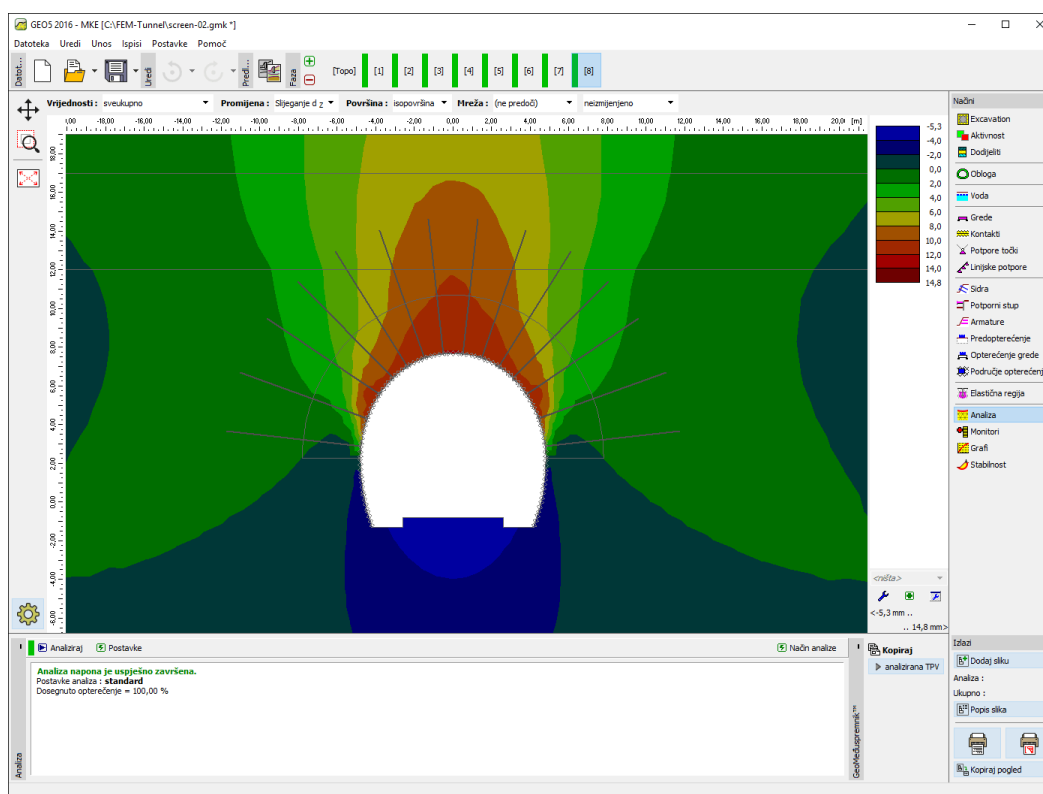
s, a – konstante ovisne o karakteristikama stijenske mase.

Za vrijednosti parametara m_b, s i a dani su izrazi u zavisnosti od geološkog indeksa čvrstoće koji predstavlja pojednostavljeni klasifikacijski sustav određivanja čvrstoće stijenske mase. 2020. godine u empirijske izraze uveden je faktor poremećaja D ovisan o stupnju poremećaja stijenske mase uslijed miniranja i relaksacije stanja naprezanja. Faktor D varira od 0 za neporemećenu stijensku masu do 1 za vrlo poremećenu stijensku masu. Nadalje, iskustva stečena projektiranjem i izvedbom visokih stijenskih pokosa pokazala su kako Hoek-Brownov kriterij za neporemećenu stijensku masu daje preoptimistične rezultate te još uvijek daje previsoke vrijednosti posmične čvrstoće. Potrebna su daljnja proučavanja uspostave veze procijenjene čvrstoće Hoek-Brownovim kriterijem i utvrđene povratnim

analizama na osnovi terenskih utvrđenih slojeva u stijenskoj masi, posebice za stijenske mase niskih čvrstoća i klasifikacijskih vrijednosti. [1]

2.4. Nesigurnosti vezane uz modeliranje

Numeričko modeliranje ima vrlo široku primjenu u geotehničkom inženjerstvu. Modeliranje predstavlja stvaranje modela primjenom računala tj. softvera, a model treba što je moguće bolje i realnije opisati stvarni problem (slika 4.). Pritom je važno u prvom redu dobro razumjeti ponašanje i prirodu samog materijala da bi ga opisali određenim modelom. Tu nailazimo na prve nesigurnosti povezane s numeričkim modeliranjem, a vezane su uz već spomenutu prirodu materijala, odabir parametara čvrstoće i deformabilnosti. Nesigurnosti u modelu neizbježne su i iz razloga što modeli u predstavljaju pojednostavljivanje realnog i vrlo složenog stanja, rubnih uvjeta itd. Također treba imati na umu da se jednostavnije geotehničke zahvate može modelirati dvodimenzionalnim modelima, ali da složenije situacije 2D model neće dati dovoljno pouzdane rezultate.



Slika 4: Primjer modeliranja tunela u GEO5-MKE-Tunnel softveru [8]

3. OPASNOST OD POPLAVLJIVANJA U TUNELIMA

Poplava je pojava neuobičajeno velike količine vode na određenom području zbog djelovanja prirodnih sila (velika količina oborina, nagomilavanje leda u vodotocima, klizanje tla ili potres) ili drugih uzroka poput popuštanja brana, ratnih razaranja i slično. [9]

3.1. Podzemna voda

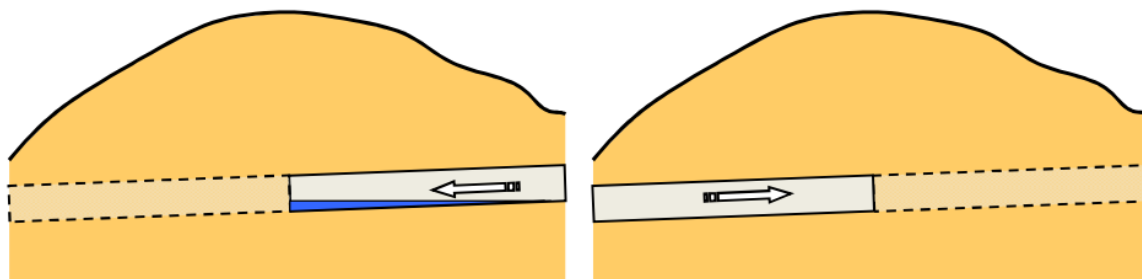
Izgradnja objekta ili iskop materijala mijenjaju hidrogeološke uvjete u podzemlju. Prilikom promjene hidrogeoloških uvjeta najčešće dolazi do promjene smjera tečenja podzemne vode, odnosno do promjene razine podzemne vode. Prirodne hidrogeološke značajke stijene ili tla (poroznost i propusnost) mogu dovesti do raznih inženjerskih problema poput pojave klizišta na padinama izgrađenih od naslaga različite vodopropusnosti. Svi inženjerski zahvati u pravilu rezultiraju poremećajem prirodnog stanja napreznja u stijeni ili tlu. Posebnu pažnju podzemnim vodama treba pridodati prilikom crpljena ili iskopa građevinskih jama ili tunela gdje dolazi do značajnijih promjena smjera tečenja podzemne vode. Ukoliko inženjeri zanemare postojanje podzemne vode prilikom radova u podzemlju moguća je pojava poplave što dovodi do velikih šteta na objektu koji se gradi ili opremi koja se pritom koristi, a čiji su troškovi sanacije vrlo skupi (slika 5). [10]



Slika 5: Podizanje vode prilikom iskopa [10]

Stoga je važno istraživačkim radovima prije početka gradnje utvrditi razinu podzemne vode i predvidjeti njezino ponašanje prilikom promjena uvjeta na terenu. Drenažom je moguće zaštititi građevinu od prodora podzemne vode. Potrebno je odabrati povoljniju varijantu smjera iskopa tunela s obzirom na nagib nivelete tunela. Bušenje tunela „nizbrdo“ omogućuje zadržavanje vode u cijevi i na čelu pa je stoga povoljnije bušenje tunela „uzbrdo“

gdje se voda prirodno drenira kroz cijev tunela i ne zadržava na kritičnim točkama iskopa (slika 6). [10]



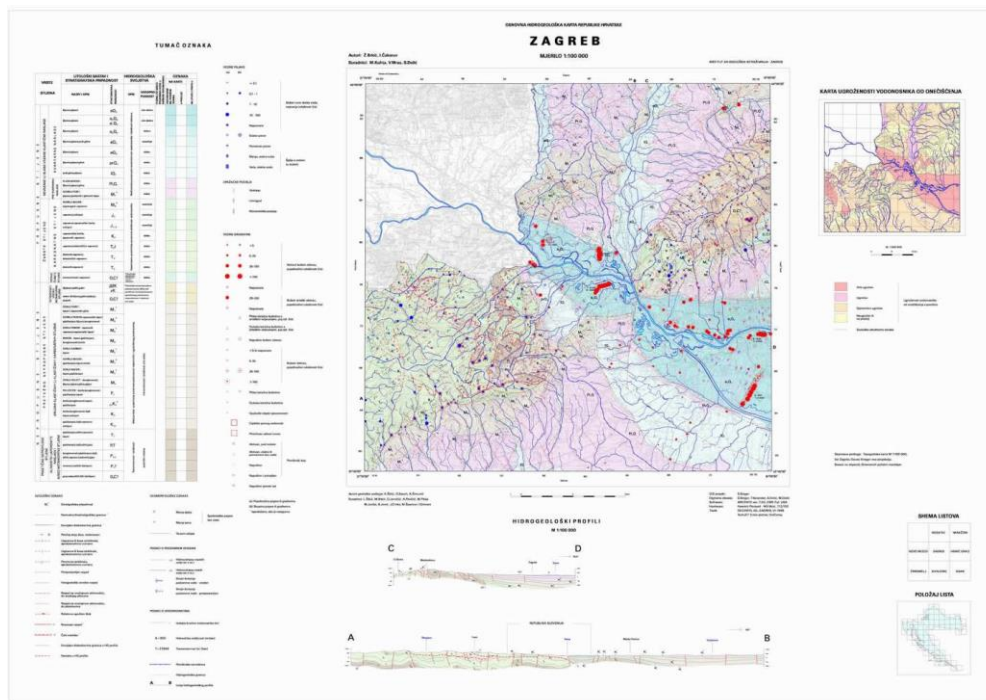
Slika 6: Bušenje tunela "nizbrdo" i "uzbrdo" [10]

Zadržavanje podzemne vode najkritičnije je u području podnožnog svoda, gdje postoji opasnost od bubrenja materijala u slučaju prisutnosti minerala gline iz skupine montmorilonita. Bubrenje i stezanje materijala (u suhim uvjetima) u podnožnom svodu uzrokuje daljnju dezintegraciju materijala i degradaciju prognoziranih parametara čvrstoće. U eksploataciji tunela će takve situacije imati hazardne posljedice i za konstrukciju (cestovnu ili željezničku).

Kao što je spomenuto, prisutnost podzemne vode u stijenskoj masi ima vrlo veliki utjecaj na trošenje materijala. Posebice su ugroženi diskontinuiteti, kao glavni putevi tečenja podzemne vode u stijeni, te materijal u neposrednoj blizini diskontinuiteta gdje trošenje započinje. Voda sadrži različite kemijske tvari koje vode do različitih procesa (kemijskog trošenja), a onda i fizičke dezintegracije stijene.

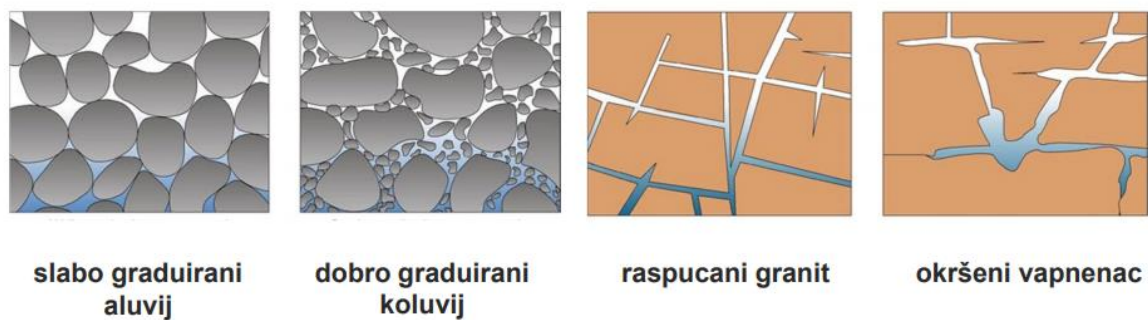
3.2. Hidrogeološke karakteristike stijene i tla

Važno je poznavati i pravilno čitati hidrogeološke karte, koje sa znanstveno utemeljenim podacima o podzemnim vodama, njihovom pojavljivanju i obnavljanju, daju važne informacije i usmjeravaju trasu tunela (slika 7.). Stoga svaki projektant tunela mora dobro odrediti trasu tunela kako ne bi presjekao podzemne tokove i daljnjim radovima doveo do neželjenog plavljenja. [10]



Slika 7: Osnovna hidrogeološka karta Republike Hrvatske - list Zagreb [11]

Pojava vode u podzemlju uvjetovana je postojanjem šupljina i mogućnošću da te šupljine budu ispunjene vodom. Kretanje podzemne vode izravno ovisi o fizičkim karakteristikama stijene ili tla u kojima se nalazi. Količina i kretanje podzemne vode značajno će se razlikovati ovisno o geološkoj građi područja zahvata (slika 8.). Poroznost i raspucalost stijene preduvjet su za nakupljanje podzemne vode u njoj. U stijeni se razlikuju primarna i sekundarna poroznost. Primarna poroznost nastaje istodobno s nastankom stijene pri čemu se pore formiraju zajedno sa svim ostalim strukturalnim značajkama materijala, dok sekundarna nastaje raznim procesima koji se odvijaju nakon nastanka stijene i vezuje se uz diskontinuitete. [10]



Slika 8: Različita geološka građa i kretanje vode [10]

Propusnost nekog materijala predstavlja njegov kapacitet za protjecanje fluida u njemu i iz njega bez oštećenja njegove strukture, a o vodopropusnost naslaga izravno ovisi brzina kretanja podzemne vode. Različiti slojevi i nagibi propusnih i nepropusnih stijena mogu se naći duž trase tunela. Obilne kiše ili snijeg mogu napuniti šupljine nepropusnih stijena vodom poput vodonosnika u fazi gradnje tunela te uzrokovati poplave. Tijekom probijanja tunela kroz nepropusni u propusni sloj, zarobljena procijeđena voda može iznenada izaći van te dovesti do plavljenja. [12]

3.3. Vremenske nepogode

Poplave uzrokovane obilnim kišama, uraganima i tsunamijima uzrokuju zabrinutost u obalnim i priobalnim područjima. Primjerice, oluje u New Yorku tijekom velikih plima mogu izazvati plavljenje dijela podzemne željeznice, što zahtijeva zaštitu površinskih pristupnih točaka od porasta razine vode. Jedna oluja, s obzirom na okolnosti, može rezultirati stalnim naletima oluja i izazvati ozbiljnije poplave i upad slane vode u podzemne radove što se i doživjelo tijekom uragana Sandy 2012. godine u SAD-u. [13]

3.4. Zaštita tunela od vode

Uklanjanje vode tijekom izgradnje tunela smanjuje alkalnost vode, količinu blata i otpadnih voda, ali umanjuje i mogućnost pojave procesa kao što su bubrenje i trošenje materijala koji mogu utjecati na parametre čvrstoće i stabilnosti. Površinske vode potrebno je ispustiti u za to predviđeni jarak, a spremnici za mulj koji sadrže opremu za čišćenje olakšavaju postrojenjima za obradu otpadnih voda njezino pročišćavanje. Voda koja se ispušta u bilo koji recipijent mora zadovoljiti tražene tehničke uvjete, a kvaliteta se nadzire tijekom i nakon izgradnje podzemnog objekta. U slučaju vodoosjetljivih stijena poput krša unaprijed je potrebno u obzir uzeti uklanjanje onečišćenih voda najkraćim putem jer je pronos onečišćenja značajno brži zbog postojanja podzemnih struktura. Tijekom samog iskopa treba prikupiti i ukloniti vodu koja ističe kroz primarnu podlogu od mlaznog betona pomoću crijeva i cijevi. Ispod donjeg svoda tunela voda se prikuplja materijalima za odvodnju i pravilno odvodi do najdubljeg dijela donjeg svoda. Isti postupak treba primijeniti i u dijelovima tunela s ravnom podlogom. [14]

Zaštita tunela od prodora vode značajna je i u pogledu stabilnosti iskopa i ugrađene podgrade. Veći hidrostatski pritisak može predstavljati dodatno i preveliko opterećenje, te

ukoliko nije uzet u obzir ugroziti stabilnost podgradnih sustava. Zbog svega spomenutog, izuzetno je važno poznavati hidrogeološke prilike i računati s njima.

4. RIZICI TUNELOGRADNJE U KRŠU

4.1. Općenito o kršu

Krš je naziv za karakteristične površinske i podzemne oblike reljefa koji su u geološkom vremenu oblikovani na vapnenačkoj stijenskoj podlozi pod utjecajem oborinske vode. Rasprostranjen je diljem svijeta, a u Hrvatskoj pokriva čak 46 % teritorija [15]. Takva područja imaju izrazito razvijenu hidrografsku mrežu pa ih je potrebno dobro zaštititi od onečišćenja. Tunelogradnja u kršu izrazito je složena, a prije gradnje svakako je potrebno istražiti sve krške fenomene. Nepovoljna strukturna geologija i nedovoljna geološka istraživanja često rezultiraju hazardima u tunelima. U hrvatskom kršu izgrađeni su brojni prometni i hidrotehnički tuneli, a većina ih je iskopana konvencionalnim načinom koji podrazumijeva bušenje i miniranje dok su kod dva tunela korišteni strojevi za iskop u punom profilu [15]. Karbonatne stijene Dinarskog krša pokazuju dobro geotehničko ponašanje pod uvjetom da nisu karstificirane i tektonski jače poremećene, ali građenje u ili na njima može biti vrlo problematično. Tunelograditelji u hrvatskom kršu suočeni su s brojnim problemima, a neki od njih opisani su u nastavku poglavlja. [15]

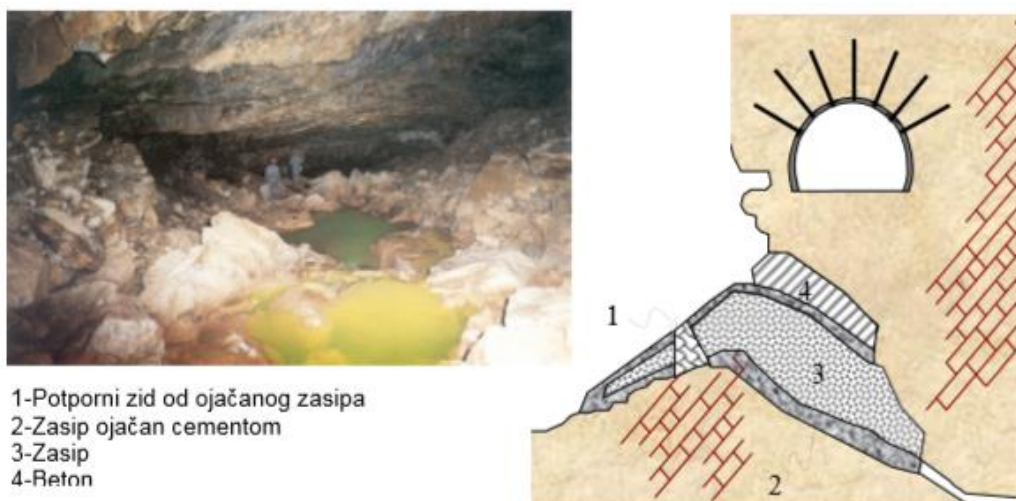
4.2. Pojava praznih kaverni

Pojava praznih kaverni različitih dimenzija na trasi ili u blizini tunela nepovoljna je za svakog graditelja. Kod hidrotehničkih objekata problem nailaska na veliku kavernu može se jednostavno riješiti promjenom trase tunela, dok je kod prometnih tunela to znatno teže. Problem se može riješiti jedino izgradnjom mosta ili zatrpavanjem kaverne do nivoa prometnice što drastično povećava cijenu izgradnje prometnog tunela. U praksi su se pojavili različiti slučajevi koji su na različite načine sanirani. [15]

4.2.1. Tunel Učka

Jednocijevni cestovni tunel Učka dugačak 5062 m građen je Novom austrijskom tunelskom metodom (NATM) od 1976. do 1981. godine. Tijekom iskopa na udaljenosti od 1300 m od Riječkog portala otkriven je vrlo razveden sustav podzemnih prostora velikih dimenzija. Najveća kaverna sastoji se od spleta kanala malih dimenzija i dvorana velikih dimenzija, od kojih jedna dvorana ima duljinu 175 m, širinu 70 m i visinu 65 m. Kako su tijekom miniranja ispadali blokovi iz svoda kaverne, koja se nalazila ispod tunela, poduzete su stabilizacijske mjere. Zbog uskog ulaza u kavernu, mehanizacije većih dimenzija i teške skele nisu se mogle primijeniti. Zaštitu od urušavanja tunela čini zasip od agregata koji se

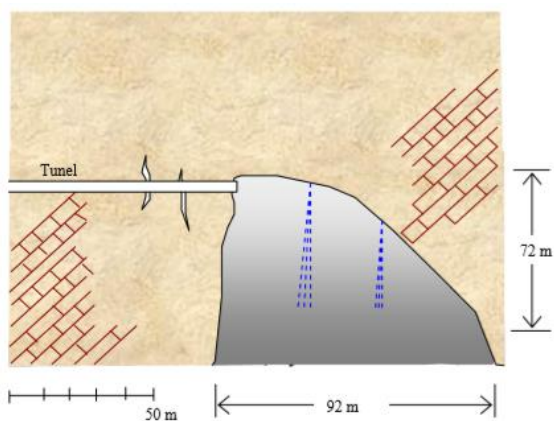
koristio na gradilištu za proizvodnju betona. Jedan dio nasipa ojačan je cementom kako bi se spriječilo njegovo odnošenje zbog cikličkih visokih voda. Uz to, u pod tunela ugrađena je armirano betonska ploča debljine 1 m (slika 9.). Sustav kaverni otkriven je sasvim slučajno zbog malog otvora u boku tunela, a kasnijim spelološkim istraživanjem ustanovilo se kako ovim sustavom protječe i do 1 m³/s vode koja se i danas koristi za vodoopskrbu grada Opatije. [15]



Slika 9: Skica sanacije kaverne u tunelu Učka [16]

4.2.2. Tunel hidrocentrale Velebit

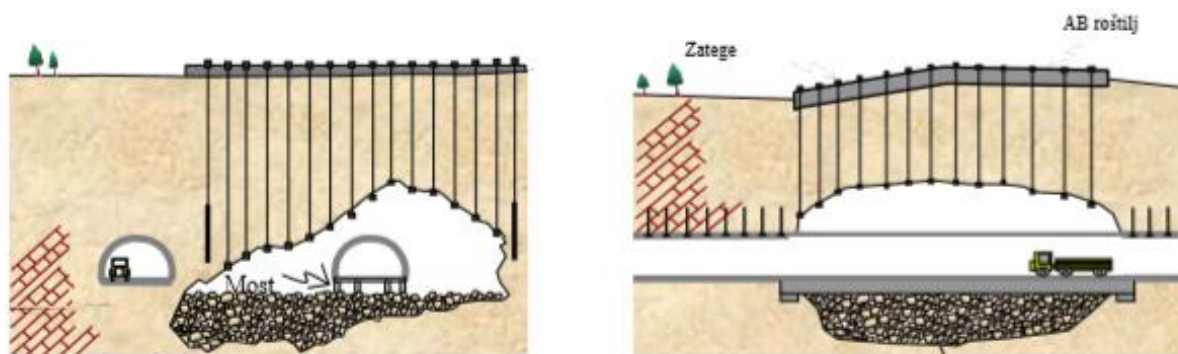
Dvovodni tunel za reverzibilnu hidroelektranu Velebit tijekom iskopa ušao je pod strop jedne od najveće otkrivene kaverne u Hrvatskoj volumena oko 1.700.000 m³ (slika 10.). Voda je kao slap visok oko 50 m istjecala između slojeva na konturama jame. Problem je riješen promjenom trase tunela kojom se jednostavno zaobišlo kavernu. [15,17]



Slika 10: Skica kaverne na trasi tunela Velebit [17]

4.2.3. Tunel Vrata

Na autocesti Rijeka-Zagreb nalazi se tunel Vrata dugačak svega 262 m koji je tijekom iskopa druge tunelske cijev ušao u kavernu volumena oko 50.000 m³. Sanacija se temelji na stabilizaciji svoda kaverne ugradnjom zatega i izgradnji mosta u kaverni na kojem je konstrukcija od rešetkastih čeličnih lukova i armaturnih mreža (slika 11.). [15,18]



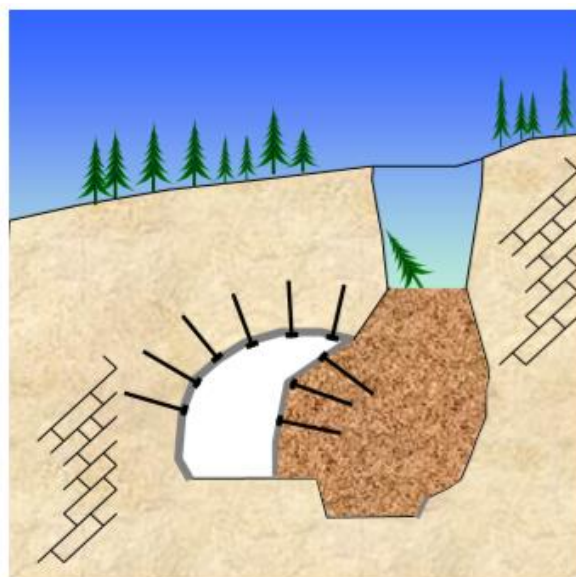
Slika 11: Skica sanacije svoda kaverne i mosta u tunelu Vrata [18]

4.3. Pojava speleoloških objekata ispunjenih tlom i kršjem

Speleološki objekti su u površinskoj zoni često ispunjeni glinom i kršjem koji imaju loša geotehnička svojstva te ugrožavaju stabilnost tunela. U praksi je obično dolazilo do toga da se ispuna pojavi na čelu iskopa i iscure u iskopani dio tunela ili da ispuna u kasnijoj fazi građenja optereti podgradu i dovede do njezina loma. Urušavanja zbog ispuna uglavnom sežu sve do površine terena. [15]

4.3.1. Tunel Lučice

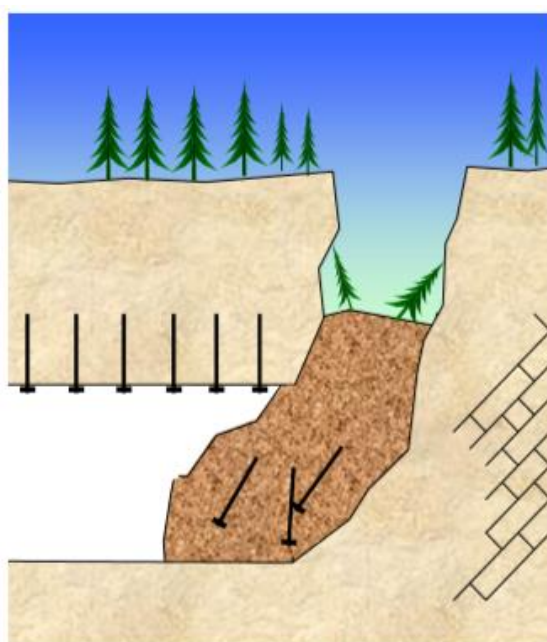
Tunel Lučice nalazi se pokraj Delnica na autocesti Rijeka-Zagreb i urušio se tijekom iskopa centralnog dijela tunela nakon što je kalota bila stabilizirana (slika 12.). Glinovito-prašinski materijal formirao je „dimnjak“, prekomjerno opteretio podgradu i prouzročio njezin lom. Potom se sav urušeni materijal iskopao, a čelo tunela stabiliziralo mlaznim betonom i sidrima. [15]



Slika 12: Skica urušavanja tunela Lučice [15]

4.3.2. Tunel Brinje

Iskop tunela Brinje vršen je u punom profilu čak i kada je tunel ušao u zonu prašinate gline nakon čega je uslijedilo urušavanje tunela sve do površine (slika 13.). Izvođač je radove pokušao nastaviti kroz urušeni materijal, a kako u tome nije uspio radove je bilo moguće nastaviti tek nakon stabilizacije čela iskopa mlaznim betonom i sidrima. Ovaj slučaj je čisti primjer nepoštivanja struke i prirode jer se pravilnom podgradom i tehnologijom rada moglo spriječiti kolaps tunela. [15]



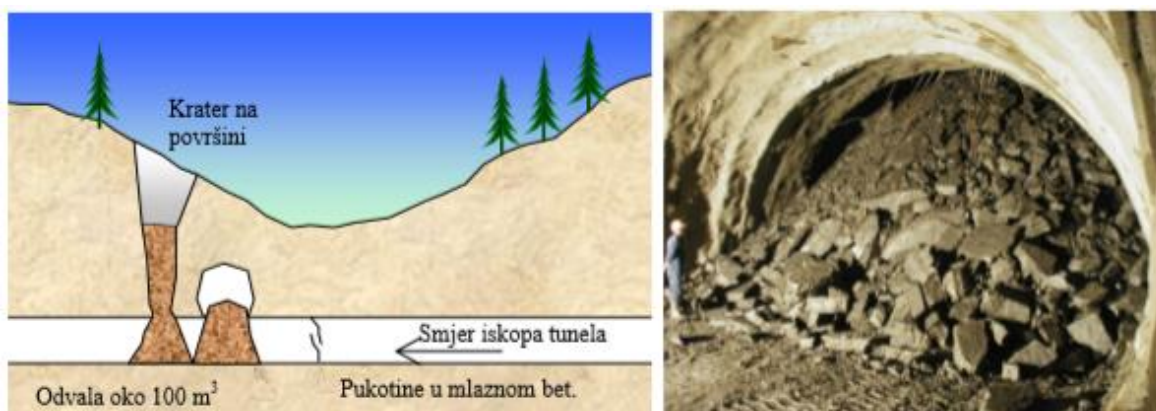
Slika 13: Skica urušavanja tunela Brinje [15]

4.4. Pojava zone loše stijenske mase

Formacije koje se pojavljuju u krškom području uzrokuju probleme pri geotehničkim radovima zbog niske čvrstoće i velike deformabilnosti. Za Istru i Dalmaciju karakterističan je fliš koji se očituje u horizontalnoj uslojenosti i poremećenosti uslijed tektonskih aktivnosti. Na pojedinim područjima fliša mogu se očekivati veće količine glinovitog materijala koji je izrazito nepovoljan za građenje svake vrste objekta, a posebno tunela. [15]

4.4.1. Tunel Javorova Kosa

Na autocesti Rijeka-Zagreb nalazi se tunel Javorova Kosa koji je dugačak 1460 m, a iskopan je u klastičnim naslagama gornjeg paleozoika koji je karakterističan materijal u području Gorskog Kotara. Tijekom pripremnih radova za betoniranje obloge prve cijevi tunela došlo je do njegovog urušavanja sve do površine, a tijekom iskopa druge tunelske cijevi pet godina kasnije urušavanje se ponovilo (slika 14.). Sanacija je izvršena na način da se urušena stijenska masa ojačala sustavom mlazno injektiranih stupnjaka postavljenih u rastreu 1x2 m u zonama glinovitog materijala. U zonama od ulomaka stijena, kroz bušeeće cijevi se utiskivala injekcijska masa nakon čijeg je stvrdnjavanja tunel iskopan pod zaštitom cijevi (pipe roof). [15]

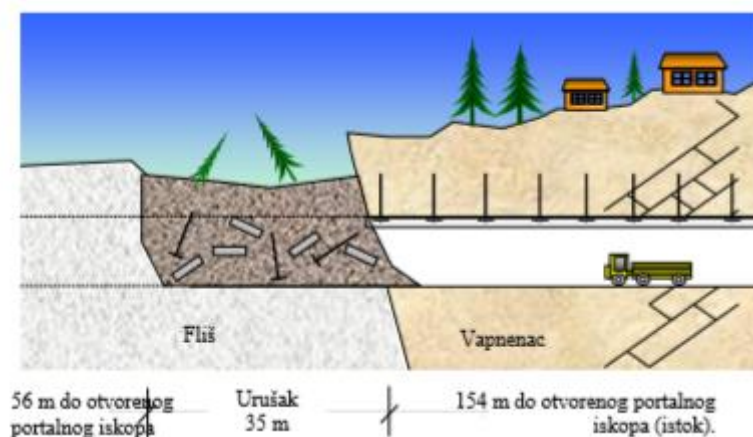


Slika 14: Urušavanje tunela Javorova Kosa [15]

4.4.2. Tunel Sveti Kuzam

U sklopu Riječke obilaznice nalazi se i dvocijevni tunel Sveti Kuzam čiji su portalni dijelovi izvedeni u otvorenom iskopu metodom cut and cover. Obje tunelske cijevi kopane su istovremeno s istočne strane, ali ne prolaze istim litološkim cjelinama. Zapadni dio tunela proteže se kroz fliš, a istočni dio kroz vapnenac. Do urušavanja ovog tunela došlo je kada je

sjeverna cijev ušla u zonu fliša, a na površini terena stvorila se velika depresija dimenzija 40x20 m i dubine 8 m (slika 15.). Tunel je saniran na način da se urušeni materijal ojačao mlaznim injektiranjem i stupnjacima u rasteru 2x2,5 m. Nakon stabilizacije iskop je nastavljen sa zapadnog portala pod zaštitom cijevi (pipe roof). [15]



Slika 15: Skica urušavanja tunela Sveti Kuzam [15]

4.5. Ispadanje blokova iz kaverne u kaloti tunela

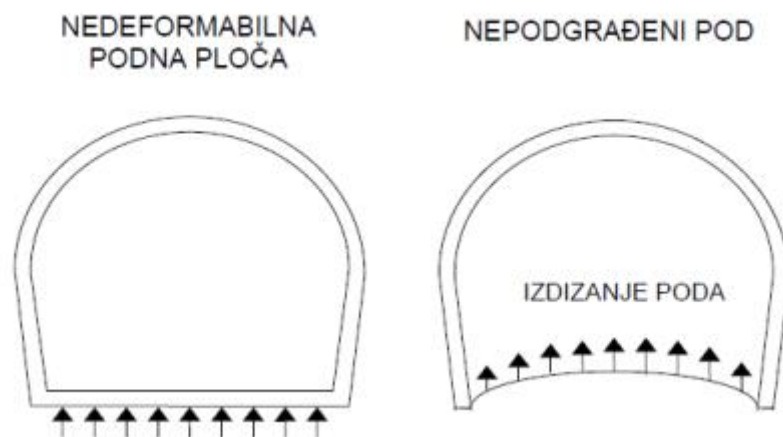
Trasa tunela vrlo često presijeca speleološke objekte koji su na većim dubinama uglavnom prazni i velikih su visina. Tada je teško ustanoviti dali u kaverni postoji nestabilan blok koji može ispasti i razbiti tunelsku podgradu. U tunelu Sv.Rok došlo je do ispadanja blokova koji su razbili podgradu tunela (slika 16.). Stabilizacija je izvršena betonskim čepom različitih debljina u kaloti tunela iznad kojeg je kaverna zapunjena pijeskom. [15]



Slika 16: Ispadanje bloka iz kaverne u kaloti tunela Sv.Rok [15]

4.6. Bubrenje mekanih stijena

Bubrenje je svojstvo tla da povećava volumen upijanjem vode kao rezultat promjena u kristalnoj rešetki određenih minerala glina, najčešće montmorilonita, kada se poveća sadržaj vode [10]. Mekane stijene sklone su bubrenju i dezintegraciji pod djelovanjem vode istovremeno. Kao što je i ranije spomenuto u radu, bubrenje u tunelogradnji uglavnom je problematično u podu tunela gdje ima najviše vode (slika 17.). Pod tunela je obično ravan pa pri većem naprezanju dolazi do plastificiranja stijena u podu, a dinamički efekti transporta pomažu dezintegraciji. Problem sa izdizanjem poda javio se u tunelu Zakućac koji prolazi kroz zone vapnenca, breče i fliša. Iskopan je pomoću stroja za iskop u punom profilu, ali je tijekom iskopa došlo je do prodora vode u drugi tunel koja je prouzročila dizanje prefabriciranih betonskih elemenata položenih na podu tunela. Voda je prouzročila dezintegraciju lapora i pojačano bubrenje što je rezultiralo izdizanjem poda do 18 cm. Potom su se svi betonski elementi uklonili sa poda tunela, a iskop je nastavljen u vlažnom laporu do dubine oko pola metra. Novi podnožni svod betoniran je na licu mjesta te je ugrađena betonska obloga po cijelom opsegu tunela. [15]



Slika 17: Izdizanje poda u tunelu [19]

5. ZDRAVLJE I SIGURNOST U PODZEMLJU

Ljudi svojim ponašanjem znatno utječu na sigurnost podzemnih građevina tijekom izgradnje i korištenja, međutim ponekad je opasnost uzrokovana prirodnim hazardima (geohazardima). Ishod potencijalnih incidenata u podzemlju uvelike će ovisiti o brzini i ispravnoj reakciji samog pojedinca, nego o samoj tehničkoj razini sigurnosti tunela (dostupni izlazi u slučaju opasnosti, mogućnost korištenja druge tunelske cijevi i slično). Stvarne opasnosti i rizici za ljude u podzemlju postoje, a pravilnim projektiranjem, građenjem i održavanjem mogu se svesti na minimum. Najčešći izvori zagađenja koji mogu potencijalno biti hazardni su upotreba eksploziva prilikom miniranja, korištenje motora s unutarnjim izgaranjem, varenje, nastanak opasnih podzemnih plinova u nedopuštenim količinama itd. Inženjeri godinama uspješno odgovaraju na brojne probleme vezane uz ovu tematiku, međutim nekad je teško predvidjeti opasnost. Razni plinovi mogu dovesti do nedostataka kisika stoga je važno tunele provjetravati tijekom građenja i tijekom eksploatacije. Opskrba kisikom mora konstantno biti veća od 20% [20]. Maksimalna dopuštena koncentracija zagađivača prikazan je u Tablici 3.

Tablica 3: Maksimalna dopuštena koncentracija zagađivača [20]

Zagađivači	Maksimalna dopuštena količina
CO ₂	5000 cm ³ /m ³
CO	30 cm ³ /m ³
Nox	5 cm ³ /m ³
SO ₂	5 cm ³ /m ³
H ₂ S	10 cm ³ /m ³
sitna prašina	4 mg/m ³
sitni kvarc	0,125 mg/m ³
respiratorna azbestna vlakna	10000 vlakna/m ³

Ostali faktori koji također direktno utječu na sigurnost zapravo mogu proizlaziti baš iz ljudskih aktivnosti poput namjernih ili slučajnih eksplozija. Važno je u potpunosti razumjeti opasnosti i rizike kao ključne dijelove dugoročne održivosti podzemlja. Postoje razni standardi i propisi koji reguliraju sigurnost podzemlja prilikom izgradnje i korištenja objekta posebice vezanih uz požare i provjetravanje, međutim, sve veći tehnološki dosezi podzemnih konstrukcija i katastrofe koje su se događale, zahtijevaju sve strože norme po pitanjima sigurnosti.

5.1. Podzemno inženjerstvo i ljudski faktor

Kako bi se stvorio funkcionalan i održiv podzemni objekt, društvene strukture koje ga koriste moraju razumjeti tehnologiju gradnje, rukovanja i uporabu iste. Istraživanjem „ljudskih faktora“ otkriven je multidisciplinarni pristup između više znanosti, uključujući koncepte koji se odnose na znanost u ponašanju kao što su sposobnost ljudske izvedbe, radna snaga, osoblje i obuka. Informacije dobivene proučavanjem ljudskih faktora mogu se primijeniti na planiranje alata, strojeva, sustava, poslova i okoliša za siguran, udoban i učinkovit ljudski rad kako bi optimizirali odnos između tehnologije i čovjeka. [13]

Mnoge primjene ovog inženjerstva povezane su s ljudskim interakcijama s pojedinim proizvodnim predmetom ili tehnologijom. Zbog složenosti podzemnih sustava raste i potreba za razumijevanjem, projektiranjem, regulacijom i radom u odnosima između ljudi i tehnologije. Neuspjeh ključnih infrastrukturnih komponenti, uključujući ljude i/ili sustave, može biti izrazito negativan za održivo funkcioniranje urbane okoline. Međutim ljudsko ponašanje nije uvijek predvidljivo u slučaju nepovoljnih i ekstremnih situacija pa bez obzira na koliko su podzemni sustavi otporni na opasnosti može doći do negativnih posljedica. Svi oblici podzemnog inženjerstva moraju u obzir uzeti ne samo smjernice za obuku i sigurnost potrebne za neometano funkcioniranje infrastrukture, već moraju predvidjeti i ponašanje podzemnih putnika u slučaju normalnih, ali i najgorih scenarija. Uvođenjem inženjeringa ljudskog faktora može se spriječiti panično i nekontrolirano ponašanje u kriznim trenucima. [13]

International Tunneling and Underground Space Association (Međunarodna udruga za tunelogradnju - ITA) osnovala je Odbor za sigurnost rada podzemnih objekata (Committee on Operational Safety of Underground Facilities - COSUF) za rješavanje operativnih problema zaštite i sigurnosti u podzemnim strukturama. COSUF je razvio smjernice za procjenu rizika te se s ITA za zdravlje i sigurnost usredotočio na povećanje sigurnosnih vježbi tijekom izgradnje objekta. Europska platforma za građevinsku tehnologiju (ECTP) priznaje da se sigurnost i zaštita moraju oblikovati u svaki element infrastrukture uzimajući u obzir životni ciklus iste. [13]

5.2. Regulacija i upravljanje pitanjem sigurnosti

Iako su inženjeri uspjeli smanjiti brojne rizike povezane s uporabom podzemnog prostora, rizici u podzemnoj infrastrukturi nisu jednako reguliranog nadzora kao oni

povezani s površinskom infrastrukturom. Postojeći propisi obično propisuju posebne postupke ili materijale, ali podzemni objekti predstavljaju mnogo veće sigurnosne izazove koje takvi propisi ne mogu zadovoljiti. Primjer takvih razlika u sigurnosti može biti izbijanje požara. Na objektima visokogradnje, u slučaju nužde, ljudi će se evakuirati spuštanjem po stepenicama do prizemlja kako bi se sklonili dalje od zgrade. No kod podzemnih objekata moguće je samo premještanje ljudi u neki drugi podzemni prostor koji će vjerojatno biti i vrlo zadimljen, a izlazak iz podzemlja biti će i fizički zahtjevan. [13]

Sigurnost je ponekad bolje stvoriti operativno nego tehničkim rješenjima, primjerice da nema opasnih materijala ukoliko nisu postavljene odgovarajuće prskalice ili drugi sustavi. Nažalost, sigurnosna pravila pišu se tek nakon određenih incidenata, a ne kao plod istraživanja i nalaženja najboljih mogućih rješenja. Odgovorna strategija upravljanja rizikom uključuje prepoznavanje i razumijevanje rizika te primjenu odgovarajućih strategija ublažavanja. Prepoznate podzemne rizike moguće je izbjeći, prenijeti ili smanjiti na prihvatljive. Ponekad izbjegavanje ili prijenos rizika nije moguće pa se najbolje rješenje postiže smanjivanjem rizika. U nekim slučajevima troškovi smanjivanja rizika mogu biti značajni i vrlo visoki te se direktno mogu odraziti na troškove izgradnje ili na operativne troškove pa takvi objekti ne zadovoljavaju ekonomske kriterije. [13]

Uprava za sigurnost na radu (Occupational Safety and Health Administration - OSHA) u SAD-u uključuje propise koje se odnose na podzemnu gradnju, a primjenjuje se na izgradnju tunela cut and cover metodom, šahtova, komora i prolaza. OSHA propisi odnose se na ublažavanje opasnosti povezanih sa smanjenom prirodnom ventilacijom i svjetlom, teškim i ograničenim uvjetima rada, izloženosti onečišćenog zraka, vatrom ili eksplozijom. Tunel je definiran kao podzemni iskop čija dužina os ne stvara kut veći od 20 stupnjeva od horizontalne osi. Iako su propisi primjenjivi na razne tipove podzemnih objekata, oni se prvenstveno odnose na zaštitu građevinskih radnika tijekom izgradnje. Pitanje sigurnosti u eksploataciji objekata nije propisima uređeno. Neadekvatnost sigurnosnih standarda posljedica je njihovog razvijanja bez razmatranja porasta svih vrsta i velikih razmjera podzemne upotrebe. [13]

Podzemna infrastruktura samo je jedan od elemenata cjelokupnog urbanog sustava koji je danas sve više međusobno povezan i ovisan. Odluke o sigurnosti jednog infrastrukturnog elementa moraju se temeljiti na rezultatima te odluke na cjelokupni sustav. Potražnja za upotrebom podzemlja sve više raste pa je bez pažljivo razmotrenih smjernica na nacionalnoj

razini, koje su temeljene na istraživanju ili učinkovitosti sigurnosnih standarda, nemoguće osigurati pravilne i kvalitetne sigurnosne uvjete. [13]

5.3. Opasnosti za zdravlje ljudi

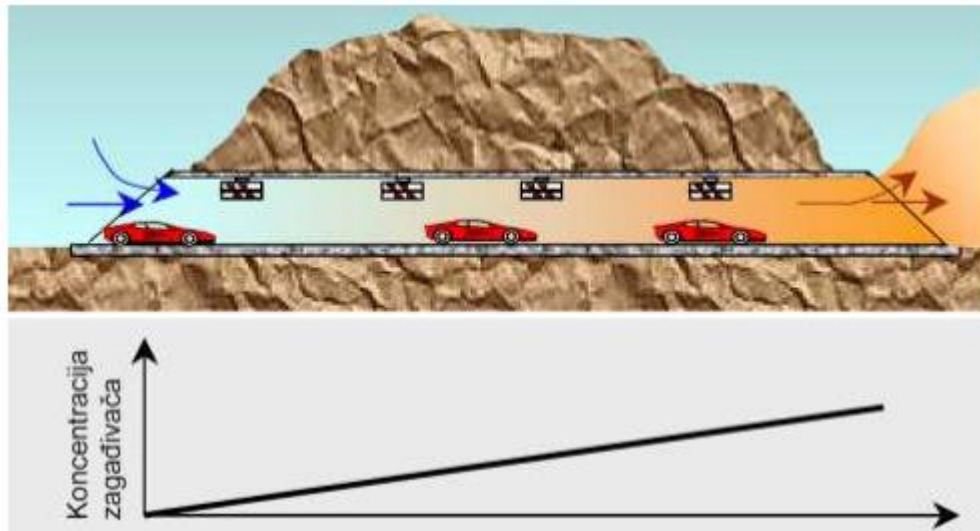
Najveće opasnosti koje se kriju u podzemlju i štetne su po ljudsko zdravlje su nedostatak odgovarajuće ventilacije, dim od vatre i opasni materijali, dok izravan psihološki utjecaj na zdravlje i sigurnost ima rasvjeta tunela. Neke od opasnosti i rizika mogu se operativno spriječiti, druge možemo riješiti tehničkim rješenjima već u fazi projektiranja ili se pak mogu sustavno kontrolirati. Pažljivom analizom svi mogućih scenarija u slučaju nužde može se prevenirati i izbjeći potencijalne rizike. Treba predvidjeti sve moguće greške tehničkog sustava održavanja tunela te osigurati alternativne izvore u slučaju kvara pojedine instalacije. Bez takvog načina osiguravanja sigurnosti čak i jednostavan mehanički kvar može za posljedicu imati štetu velikih razmjera. [13]

Prilikom projektiranja, izgradnje i korištenja tunela potrebno je uzeti u obzir:

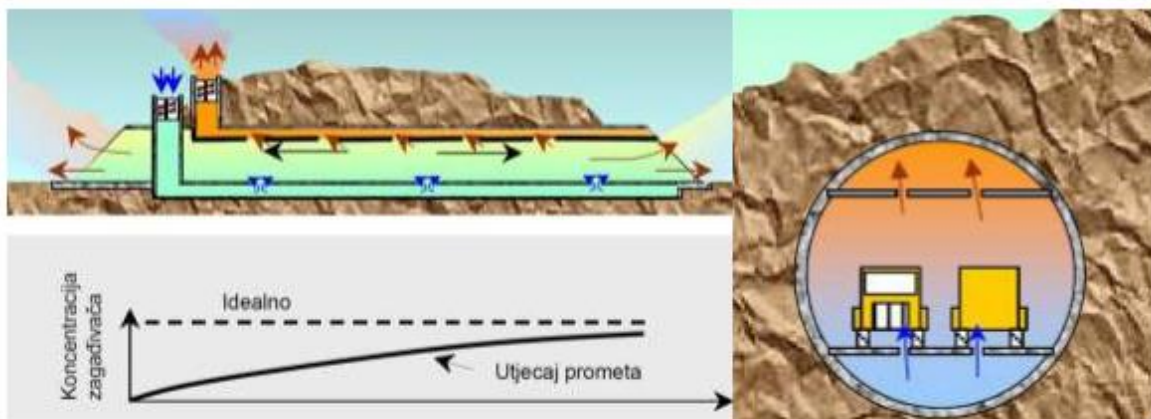
- kontrolu zagađivača koje emitiraju cestovna vozila, kod normalnog i vršnog prometnog toka;
- kontrolu zagađivača koje emitiraju cestovna vozila kada je promet zaustavljen zbog incidenta ili nesreće;
- kontrolu temperature i dima u slučaju požara, a kod dvocijevnih tunela mogućnost sprečavanja prodora dima iz ugrožene u drugu (evakuacijsku) cijev. [21]

Kod izgradnje dužih tunela, gdje nije moguća brza prirodna ventilacija, iskop nije dozvoljen ako nije uspostavljen siguran sustav ventilacije. Ventilatori se uobičajeno postavljaju izvan tunela na lokaciji gdje imaju nesmetan dovod svježeg zraka, koja nije u blizini spremišta ulja, kemikalija ili bačava s gorivom. Ventilator mora biti tako smješten da ne uvlači ispušne plinove vozila kao ni pare i plinove od punjenja baterija, kao i izlaznih onečišćenja iz tunela. Zahtijevana količina svježeg zraka za jednu osobu je $2\text{m}^3/\text{min}$, a za kW dizel motora $4,0\text{ m}^3/\text{min}$ [20]. Oprema za mjerenje u tunelu mora biti pogodna za kontinuirano mjerenje razine eksplozivnih i štetnih plinova i udjela kisika, te zvučnim i vizualnim signalima odaslati upozorenje u slučaju da sadržaj kisika padne ispod razine sigurne za rad. Kod isključenja i ponovnog ukapčanja ventilatora stanje zraka mora se ispitati prije ulaska zaposlenih u tunel. U slučaju kvara ventilacijske opreme osoblje se mora povući sa podzemnih radova, rad stroja se odmah prekida i stroj se izolira dok se ventilacija ne popravi.

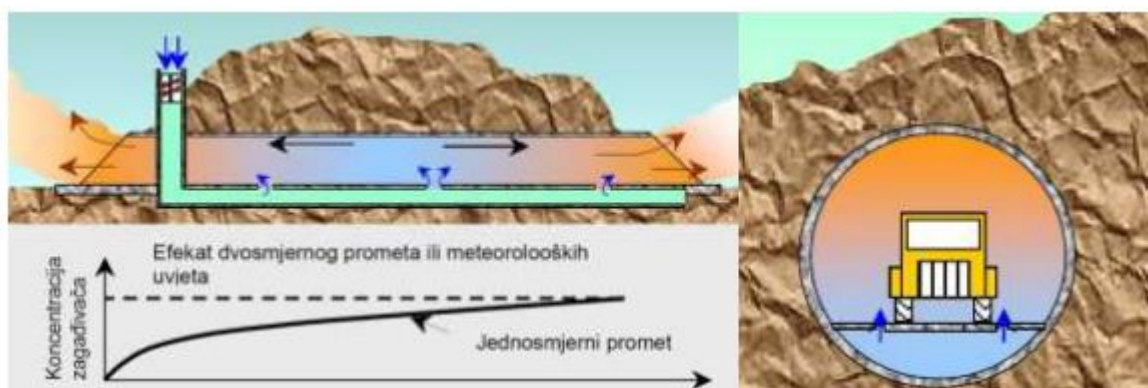
Tijekom korištenja tunela, provjetravanje može biti prirodno ili mehaničko (umjetno). Mehanički sustavi ventilacije mogu biti uzdužni, poprečni ili polupoprečni (slike 18., 19. i 20.). [21]



Slika 18: Uzdužna ventilacija tunela i koncentracija zagađivača [22]



Slika 19: Poprečna ventilacija tunela i koncentracija zagađivača [22]

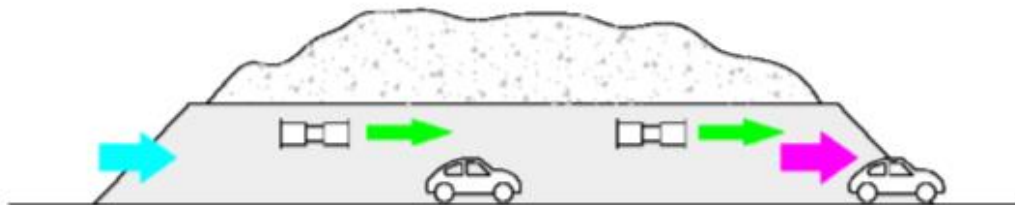


Slika 20: Polupoprečna ventilacija tunela i koncentracija zagađivača [22]

Mehanički sustav ventilacije mora se postaviti u svim tunelima duljim od 1000m s prometnim opterećenjem većim od 2000 vozila po prometnoj traci na dan. Za tunele duljine od 500m do 1000m i prometno opterećenje >2000 vozila na dan, potrebno je numerički dokazati da nije potrebna ugradnja mehaničkog sustava ventilacije, uzimajući u obzir redovni pogon i uvjete požara. [21]

Podzemni ventilacijski sustavi mora osigurati odgovarajuću kvalitetu svježeg zraka i eliminirati opasne plinove poput ugljičnog dioksida. Dovod zraka s površine ponekad nije adekvatan jer je takav zrak onečišćen i ne sadrži dovoljnu količinu kisika. Opasni plinovi mogu se ukloniti pročišćavanjem podzemnog zraka ili sigurnim usmjeravanjem kontaminiranog zraka na površinu.[13]

Najduži cestovni tunel u Hrvatskoj, tunel Mala Kapela ima sustav uzdužne reverzibilne ventilacije sa impulsnim aksijalnim ventilatorima smještenih na svodu tunela (slika 21. i 22.). Karakteristika ovog sustava je u tome što čisti zrak ulazi na jednom portalu tunela i struji slobodno kroz cjelokupni poprečni presjek tunelske cijevi prema izlaznom portalu. Impulsni ventilatori projektirani su za rad pri visokim temperaturama od 250 °C u vremenu od 90 minuta. [23]



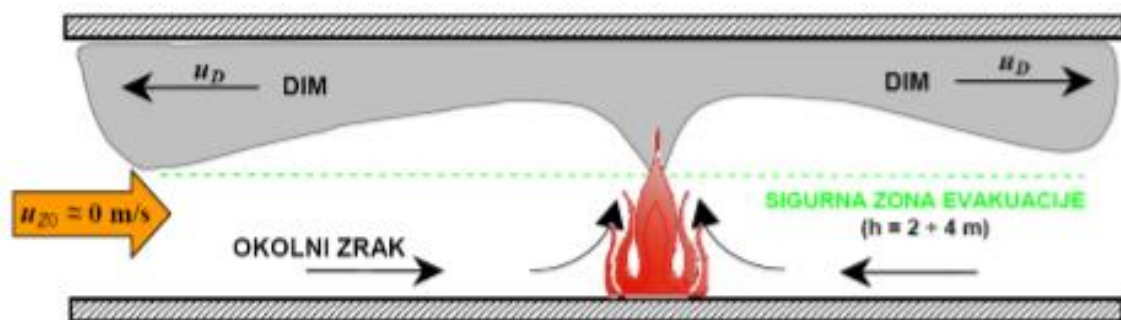
Slika 21: Shematski prikaz uzdužne ventilacije sa impulsnim aksijalnim ventilatorima [23]



Slika 22: Ventilacija u tunelu Mala Kapela [24]

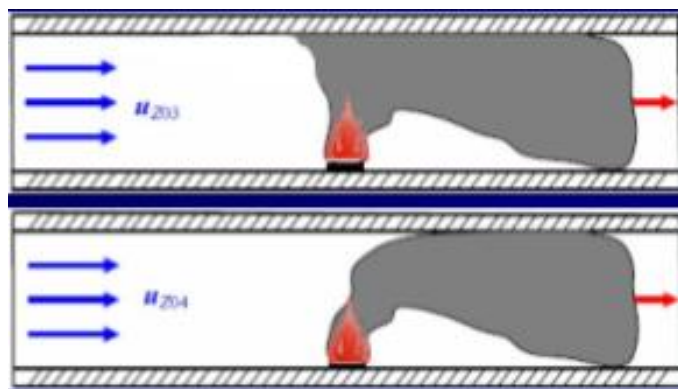
Dim od vatre svakako je jedna od najvećih opasnosti za zdravlje i sigurnost ljudi u podzemlju. Jasno je kako požar u podzemlju znatno štetniji od onog na površini pa stoga posebnu pažnju u tunelima treba posvetiti zaštiti od požara. Podzemna područja višestruke namjene u urbanim sredinama znatno su složenija za provjetravanje od primjeri cestovnih tunela pa zahtijevaju i najsofisticiranije ventilacijske sustave. Također potrebno je razlikovati razdiobu dima u visokim zgradama i podzemnim strukturama velike površine. Ventilacija u tunelu, ne samo da mora osigurati dovoljnu količinu zraka, već u uvjetima požara pružiti vrijeme za evakuaciju putnika, osigurati interventnim službama pravovremeni pristup i efikasno gašenje požara te uvjetno očuvati statičku stabilnost građevine. Operativna strategija sustava ventilacije u uvjetima požara zahtjeva analizu rezultata, informacija i opažanja kako bi uspješno odgovorila na postavljene zadaće. Aerodinamične pojave koje karakteriziraju rad sustava provjetravanja u uvjetima požara su stratifikacija dima, odimljavanje i „kritična brzina“ te povratno strujanje dima, tzv. „backlayering“. [23, 25]

Stratifikacija dima predstavlja pojavu uzgonskog kretanja dima prema stropu tunela i u idealnim uvjetima uzrokuje ravnomjerno slojevito širenje dima uz strop, simetrično na obje strane od mjesta nastanka požara (slika 23.). [23]



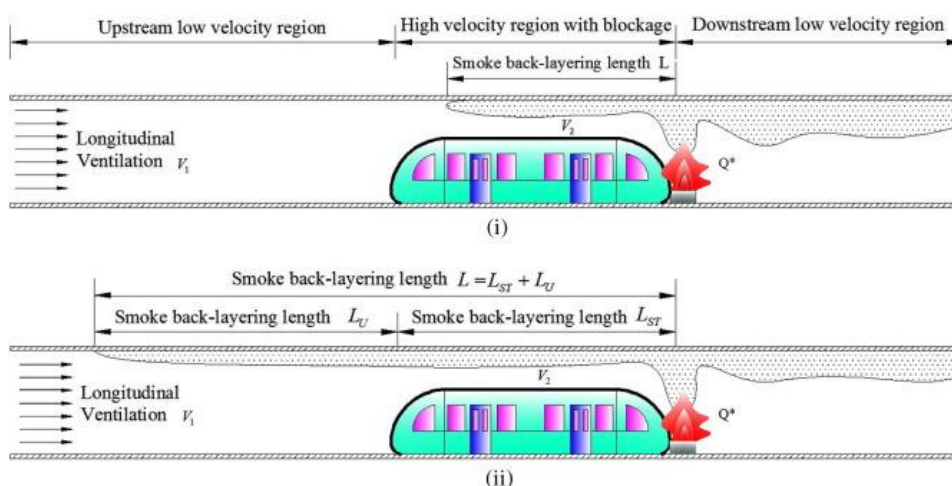
Slika 23: Stratifikacija dima [23]

Kritična brzina definira se kao minimalna uzdužna brzina strujanja zraka kod koje je onemogućeno povratno strujanje dima, a sustav ventilacije se koristi za kontrolu širenja dima (slika 24.). [23]



Slika 24: Kritična brzina [23]

Backlayering je naziv za pojavu kada se dim kreće u suprotnom smjeru od strujanja zraka u tunelu i treba je spriječiti odgovarajućom brzinom provjetravanja koja se izračuna (slika 25.). [23]



Slika 25: Povratno strujanje dima [26]

Obzirom na razne čimbenike koji utječu na požar, nerijetko se u tunelima provode probna paljenja požara kako bi se najbolje utvrdili stvarni uvjeti u danoj situaciji što je i prikazano na slici 26. gdje je paljenje izvedeno u tunelu Sveti Rok . [27]



Slika 26: Probno paljenje u tunelu Sveti Rok [27]

Opasni materijali, koji se koriste ili stvaraju prilikom proizvodnje, prerade ili isporuke, predstavljaju posebne rizike u podzemlju. Izlijevanje opasnih tekućina može predstavljati dugotrajan rizik za zdravlje ukoliko uđu u ventilacijski i odvodni sustav ili prodru u susjedno tlo ili poroznu stijenu i tako zagade okoliš ili vodne resurse.

Prvenstveno iz sigurnosnih (a onda i psiholoških) razloga važno je i pitanje rasvjete tunela, kako prilikom izgradnje tako i tijekom korištenja. Rasvjeta se mora izvesti na način da osigurava primjerenu vidljivost danju i noću u zoni ulaza i izlaza (prilagodnih zona), kao i u unutrašnjosti tunela [21]. U slučaju kvara rasvjete, kada je uključena rasvjeta u nuždi, brzina vožnje pri ulasku u tunel ograničava se na 60 km/h i manje, pomoću promjenjivih prometnih znakova koji se postavljaju neposredno prije ulaska u tunel [21]. U slučaju kvara opskrbe električnom energijom, mora se izvesti sigurnosna rasvjeta, kojom se omogućava minimalna vidljivost korisnicima dok ulaze odnosno napuštaju tunel u vozilima, u vremenu od najmanje 120 minuta. Rasvjeta za izlaz (evakuaciju osoba iz tunela) postavlja se na visini od najviše 1.5 m i mora osigurati dovoljnu vidljivost u vremenu od 120 minuta.

5.4. Sigurnost od nasilja

Podzemna infrastruktura često je osmišljena kako bi podzemne objekte učinila privlačnijim i dostupnijim stanovnicima. Dizajn infrastrukture često uključuje sigurnosne uređaje za sprječavanje kriminala i vandalizma ili zaštitu od požara i izvanrednih situacija.

Nažalost, takvi elementi omogućavaju jednostavan pristup podzemlju i onim korisnicima sa opasnim ili destruktivnim namjerama. Nemoguće je kontrolirati sve pokušaje nasilja nad korisnicima ili infrastrukturom. Sigurnost i otpornost na nasilje u urbanoj zajednici mogu se poboljšati nizom planova, projekata i operativnih funkcija koje smanjuju učestalost ili jakost takvih događaja. [13]

Osjećaj osobne sigurnosti pojedinca važan je za cjelokupno funkcioniranje zajednice. Fizički dizajn i broj ljudi koji borave u zatvorenom prostoru doprinose sigurnosti pojedinaca i osjećaju zaštićenosti. Određene vrste podzemnih građevina poput pješačkih tunela mogu imati lošu reputaciju u pogledu sigurnosti zbog lošeg osvjetljenja ili dizajna. Osjećaj sigurnosti pojedinca prilikom korištenja cestovnih tunela od izuzetne je važnosti za sigurnost prometa.

Podzemlje je dugo bilo i još se koristi u svrhu zadržavanja ili sigurnosti u slučaju napada pa se na primjer koristi za zaštitu sigurnosti nacionalnih vođa. Pojavom oružja za masovno uništenje, inženjeri su 50-tih i 60-tih godina prošlog stoljeća učinili mnogo po pitanju podzemnih vojnih i obrambenih objekata. Zamjensko zapovjedno postrojenje Cheyenne Mountain Complex nalazi se duboko u granitnoj planini kako bi se osigurao kontinuitet vlasti u slučaju napada na SAD. [13]

Teroristički napadi na Sjedinjene Američke Države promijenili su način rješavanja sigurnosnih i obrambenih pitanja na globalnoj razini, uključujući dizajn i rad podzemnih struktura. Podzemna infrastruktura, posebno sustavi za masovni tranzit, danas su prepoznati kao ranjivi dijelovi u slučaju napada. Efekti eksplozija, požara, plinova i drugih toksina razorniji su u ograničenim podzemnim strukturama. Zabilježeno je nekoliko terorističkih napada na podzemnim lokacija: 1995. plinom u Sarinu, Tokyo, 2005. bombaški napad u Londonu i 2010. bombaški napad u Moskvi. Svi napadi počinjeni su pomoću uređaja koji su ručno uneseni u podzemlje. Gubitci ljudskih života i ozbiljna strukturalna, ekonomska pa čak i politička šteta mogu se ostvariti ukoliko se sigurnosne prijetnje ne procijene na odgovarajući način. [13]

6. MINIMALNI SIGURNOSNI GRAĐEVINSKI ZAHTJEVI ZA CESTOVNE TUNELE

Broj tunelskih cijevi ovisi o mnogim faktorima kao što su očekivano prometno opterećenje, stupanj sigurnosti prometa, uzdužni nagib i duljina. Ukoliko se predvidi da će prometno opterećenje biti veće od 10000 vozila po prometnoj traci na dan u projektnom razdoblju od 15 godina, potrebno je izgraditi dvije tunelske cijevi s jednosmjernim prometom. Broj prometnih traka u pravilu mora biti jednak u tunelu i izvan njega. Ulazni prostor tunela mora biti oblikovan na siguran način kako bi se spriječio nalet vozila na portalnu građevinu. Uzdužni nagib tunela ne smije biti veći od 5%. [21]

U novim tunelima, koji nemaju zaustavnu traku, potrebno je izvesti nogostupe s obje strane kolnika minimalne širine 85 cm i visine 15 cm koji se koriste u slučaju kvara ili nezgodne, dok će se u postojećim tunelima bez zaustavne trake i nogostupa primijeniti dodatne ili pojačane mjere povećanja sigurnosti. [21]

Izlazi za slučaj nužde moraju korisnicima tunela omogućiti napuštanje tunela bez vozila i dolazak na sigurno mjesto u slučaju požara ili nezgode te pristup pješice za hitne službe. Potrebno je propisno označiti izlaze za slučaj nužde, ulazni prostor obojiti zelenom bojom, a u zoni izlaza ugraditi zelene bljeskalice (slika 27.).



Slika 27: Izlaz za slučaj nužde u tunelu [28]

Izlazi za slučaj nužde izvest će se i ako analiza rizika, uključujući i parametar koliko daleko i kako brzo se dim širi u lokalnim uvjetima, pokazuje da ventilacija i druge sigurnosne mjere nisu dostatne za sigurnost korisnika tunela. U svim novim tunelima koji se grade treba

izvesti izlaz za slučaj nužde ako se očekuje prometno opterećenje veće od 2000 vozila po prometnoj traci na dan. U postojećim tunelima potrebno je analizom rizika ocijeniti izvedivost i učinkovitost primjene novog izlaza ako im je duljina veća od kilometar i prometno opterećenje veće od 2000 vozila po prometnoj traci na dan. Udaljenost između dva izlaza za slučaj nužde ne smije biti veća od 500 m. Za sprječavanje prodora dima i vatre u evakuacijske putove u prostore iza pješačkih izlaza za slučaj nužde trebaju se koristiti materijali otporni na toplinu. Na vratima koja vode iz izlaza za slučaj nužde i ulaze u drugu tunelsku prometnu cijev potrebno je postaviti znak upozorenje od naleta na dolazeće vozilo (slika 28.). [21]



Slika 28: Znak opasnosti od naleta na dolazeće vozilo [21]

Za prolaz vozila hitnih službi i evakuaciju korisnika tunela s dvije tunelske cijevi ili sa servisnom tunelskom cijevi moraju se izvesti poprečne veze na razmacima do kilometar udaljenosti koje se zatvaraju otpornim građevinskim konstrukcijama. [21]

Zaustavne površine u tunelima s jednosmjernim prometom postavljaju se s desne strane, a u tunelima s dvosmjernim prometom s obje strane kolnika. Izvode se u razini kolnika, minimalne duljine 40 m i širine 3m. Na bočnoj strani zida zaustavne površine mora biti ispisana udaljenost od izlaza iz tunela za svaki smjer (slika 29.). [21]



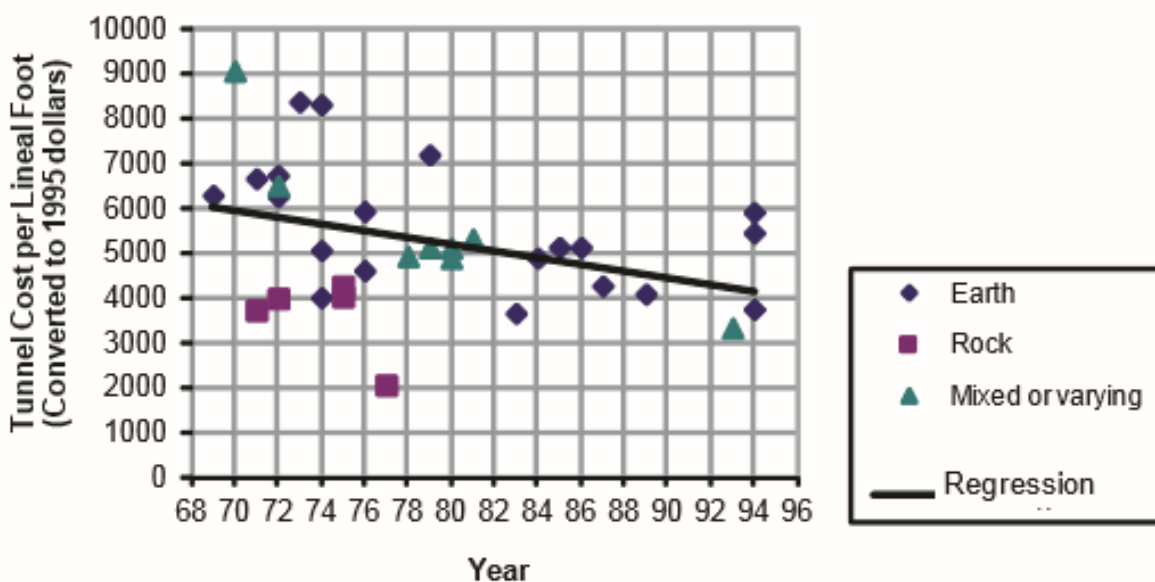
Slika 29: Prometni znak "izlaz u slučaju opasnosti" [21]

7. RIZIK OD POVEĆANJA TROŠKOVA

7.1. Ekonomska korist i troškovi

Razvoj podzemne infrastrukture pruža mogućnost za učinkovitije korištenje raspoloživog urbanog prostora, ali pritom zahtijeva značajne investicijske troškove u usporedbi s površinskom infrastrukturom. Životni vijek podzemnih objekata poprilično je dug pa stoga prije projektiranja i gradnje potrebno je dugoročno sagledati troškove koji se javljaju u takvim objektima. Poseban podzemni razvoj može spriječiti druge namjene ili ih učiniti skupljima za provedbu. Važno je prepoznati podzemni prostor kao resurs koji nam pruža brojne mogućnosti korištenja i shodno tome ga uklopiti u širi urbani razvoj planiranog područja. [13]

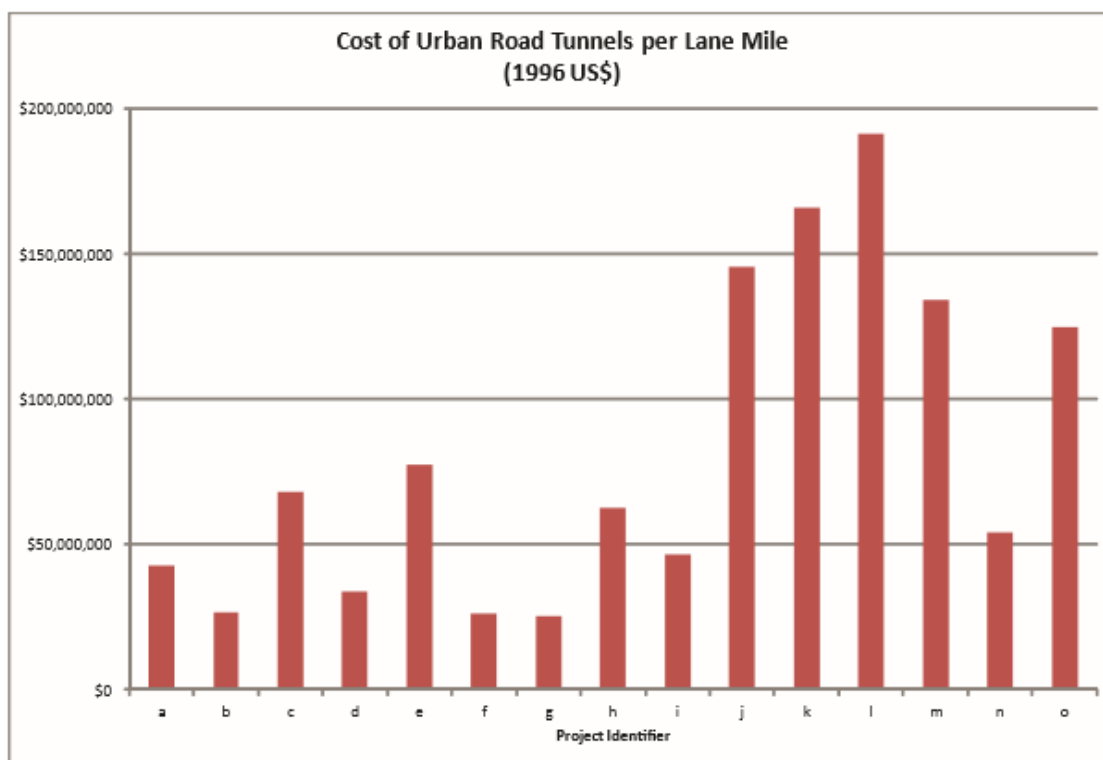
Početni troškovi podzemne gradnje uključuju troškove koji se odnose na karakterizaciju geološkog nalazišta i upravljanje geološkim uvjetima, pronalaženje i izmještanje komunalnih usluga, potencijalne poremećaje postojeće infrastrukture i kontrolu prometa. U urbanim područjima postojeće građevine ograničavaju praktično projektiranje podzemnih objekata koji se moraju prilagoditi ograničenjima u projektiranju i raspoloživosti zemljišta za izgradnju. Vrijeme povezano sa zadovoljavanjem zahtjeva vezanih za okoliš i sigurnost također se mora uzeti u obzir kod troškova izgradnje. [13]



Slika 30: Troškovi miniranja i obzida za 6 metara promjera tunela Washingtonskog metroa u periodu od 1969. do 1994. godine [13]

Slika 30 pokazuje pad linije koštanja tunela kroz period od 25 godina, točnije od 1969. do 1994. godine. Podaci se odnose na izgradnju Washingtonskog metroa čiji su troškovi gradnje bitno sniženi. Iako su troškovi projekta u velikoj mjeri ovisni o specifičnim okolnostima na terenu, upravljanje rizikom, ulaganje u istraživanja i usvajanje novih i boljih tehnologija rezultirat će smanjenje troškova izgradnje tunela. Takva smanjenje neće biti vidljiva kod novijih projekata gradnje podzemlja jer su se danas bitno povećali sigurnosni zahtjevi, a smanjili rizici povezani sa gradnjom i utjecajem na okoliš. [13]

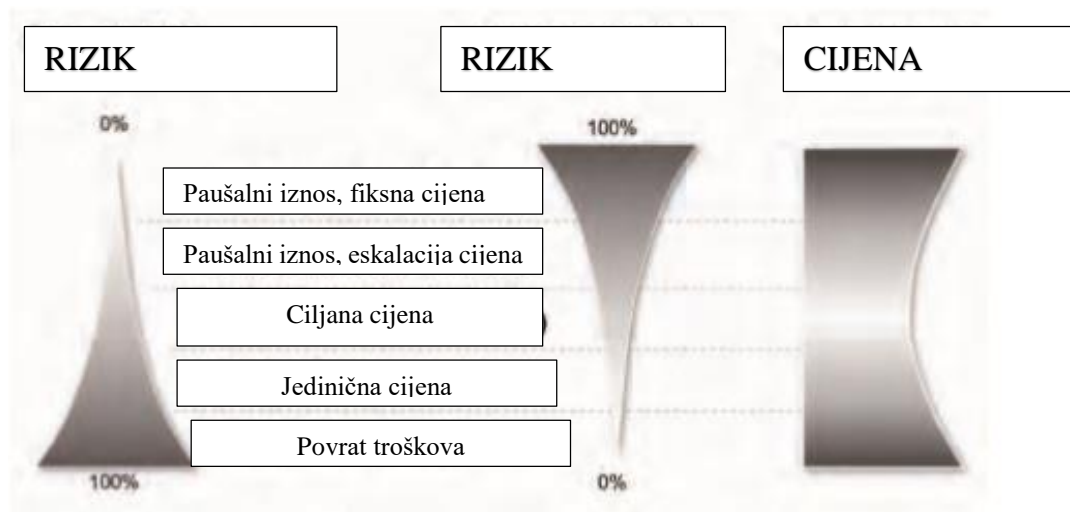
Iako lokalna geologija i geografija ima ulogu kod izgradnje tunela, nije za očekivati kako će to biti jedini razlog velikih razlika u troškovima. Važnije su razlike u standardima projektiranja, postupcima administrativnog pregleda, javnom interesu i pojednostavljenim procesima projektiranja i gradnje. Razumijevanje razloga zbog kojih troškovi tako variraju važno je kako bi se rezultati projekata razvijenih u drugim zemljama ocijenili prema drugim standardima osim visokih troškova te da se čimbenici koji njima doprinose mogu prepoznati i poboljšati (slika 31.). [13]



Slika 31: Promjena troškova cestovnih tunela na temelju podataka iz Australije, Francuske, Japana, Švedske i SAD [13]

Troškovi gradnje tunela ovise o potrebnoj razini kvalitete tunela, vođenju same gradnje, faktorima rizika i tržišnim uvjetima. Nijedna gradnja nije bez rizika te je potrebno uračunati sve moguće troškove kako bi se dobila pouzdana prognoza konačnih troškova bez prekoračenja proračuna. Tijekom faze kreiranja projekta uspostavlja se okvir troškova koji je definiran općim podacima projekta pomnoženim s određenim vrijednostima troškova temeljenih na iskustvu gotovih projekata u sličnim graničnim uvjetima. [3]

Upravljanje rizikom osnova je po kojoj se definiraju dodatni troškovi zbog potencijalnih rizika. Uspostavlja se plan upravljanja rizikom koji uključuje registar rizika za dodjelu mjera ublažavanja tijekom projektiranja i izgradnje te se uključuju troškovi mjera ublažavanja. Preostali rizici moraju se utvrditi kao i nepredviđene okolnosti pa dodati u ukupni proračun projekta tunela. Modeli nabave i način plaćanja mogu utjecati na procijenjene troškove, a posebno oni koji imaju asimetričan raspored rizika često dovode do većih troškova zbog činjenice da su viši nepredviđeni rizici povezani sa izvođačem ili investitorom (slika 32.). [3]



Slika 32: Ukupna cijena u funkciji metode plaćanja za podzemne konstrukcije [3]

7.2. Faktori troškova tunelogradnje

Temeljito analizom i savjetovanjem stručnjaka uočeni su faktori koji uglavnom utječu na ukupne troškove tunela, a prikazani su na slici 33.

Troškovi su veći što je tunel duži zbog samog obujma radova, ali i sigurnosnih zahtjeva koje je potrebno ispuniti. Teško je utvrditi odnos duljine i troškova u izgradnji tunela jer se pojavljuje niz kombiniranih faktora uključujući geološko i hidrološko stanje, način izgradnje, vrstu podupiranja i sigurnosne zahtjeve. Uz to, treba uzeti u obzir kako

povećavanje dužine tunela ima suprotan utjecaj na njegov jedinični trošak, ali pruža i veću neizvjesnost rizika. [3]

FAKTO	MOGUĆI
Dužina	Izbor načina gradnje, dodijeljeni nepredviđeni događaji
Površina poprečnog presjeka	Izbor načina gradnje, volumen iskopa terena, količina otpada za uklanjanje, količina betona i broj potpornih konstrukcija
Uvjeti tla	Planiranje i faza projektiranja, izbor načina gradnje, dodijeljeni nepredviđeni događaji
Metoda iskopa tunela	Stopa avansa, planiranje i faza projektiranja, vrijeme gradnje, dodijeljeni nepredviđeni događaji

Slika 33: Faktori koji utječu na cijenu i njihov utjecaj [3]

Trošak izgradnje tunela uvelike ovisi o veličini iskopa. Što je promjer tunela širi, veći je volumen iskopa, a time i količina potrebne mehanizacije i radne snage. Budući da troškovi iskopa iznose oko 8% troškova gradnje tunela, povećavanje promjera iskopa može imati značajan utjecaj na cijenu. [3]

Izbor metode iskopa ovisi o nekoliko zahtjeva, a u obzir treba uzeti da je odabrana metoda najbolji izbor cijene i mogućnosti. Tunelske krtice (TBM) prikladnije su za duge tunele pravilnog presjeka, dok su konvencionalne metode iskopa opravdane kod kraćih tunela nejednolikog presjeka. Neplanirana promjena metode iskopa dovodi do velikog povećanja troškova i probijanja ugovorenih rokova. [3]

Uz ova četiri osnovna faktora, važno je napomenuti kako su transport i lokacija važan čimbenik za cijenu tunela. Također troškovi materijala variraju ovisno o državi u kojoj se gradi pa svakako valja dobro proučiti građevinske zakone i propise te ustanoviti lokalnu ekonomiju i strukturu samog tržišta. Trošak radne snage predstavlja oko 20% ukupne cijene gradnje, a izravno ovisi o ekonomskim i gospodarskim čimbenicima područja na kojem se gradi. Sve ove faktore potrebno je kvalitetno analizirati kako bi formirali cijenu koštanja i uklonili sve potencijalne rizike. [3]

8. TUNELOGRADNJA I ODRŽIVI RAZVOJ

8.1. Održivost

Održivost predstavlja stupanj intenziteta neke djelatnosti kojoj se ne premašuje kapacitet prihvata okoliša. Uslijed klimatskih promjena i sve većih globalnih problema za okoliš, sve veća pažnja stavlja se na održivi razvoj i zaštitu okoliša. Neki od ciljeva održivog razvoja su zaštita i zdravlje ljudi, zaštita ozonskog omotača i ublažavanje klimatskih promjena, trajna upotreba prirodnih izvora, racionalno korištenje energije itd. Uz pojam održivost, često se spominje i otpornost kao važan aspekt održivosti, a definira se kao sposobnost reagiranja na promjene u okolini s minimalnim utjecajem na funkcioniranje. Podzemne građevine sve češće se grade iz razloga što se u velikim gradovima uvidjelo kako je površinski prostor prenapučen, premalo je zelenih površina, a velika je prisutnost betonizacije i zagađenja zraka. Danas se prometni sustavi pokušavaju smjestiti u podzemlje kako bi se kontroliralo zagađenje ispušnim plinovima. Dobro planirana i funkcionalna podzemna infrastruktura može poboljšati kvalitetu života i održivost više nego bilo koja površinska infrastruktura. Veća svijest ljudi o održivosti dovela je do toga da i inženjeri danas grade održivo. Fokus je stavljen na holističko projektiranje kojim se stvara integrirano okruženje koje omogućuje ljudima da gotovo intuitivno razumiju kako ostati siguran ako se pojave nepredviđeni uvjeti. Održivost urbane sredine ovisi o optimizaciji ljudsko-tehničkih odnosa koji pružaju sigurnost, a istovremeno su u skladu s dugoročnim društvenim vizijama. Karakteristike održivosti uključuju razmatranje ekonomičnosti, dugovječnosti, funkcionalnosti, sigurnosti i estetike te istodobno povećavanje okolišnih i društvenih koristi uz minimalne negativne utjecaje. [13, 29]

8.2. Reciklirani materijali i energetska učinkovitost

Poboljšanje održivosti zahtjeva ekonomičniju upotrebu materijala. U obzir treba uzeti korištene materijale, njihovu dostupnost, procese potrebne za njihovo stvaranje, energetska potrošnja i dugoročni utjecaj na okoliš. Primjerice beton, koji je značajan element u gotovo svim oblicima podzemne gradnje, zahtijeva visoku razinu unosa energije za njegovu proizvodnju. Dokazano je kako pojedini građevinski elementi, koji su se donedavno koristili, štetno utječu na zdravlje ljudi (na primjer, azbest). Kako je danas recikliranje postalo gotovo pa obvezno u svakom kućanstvu, tako se ono sve više primjenjuje na građevinske materijale. Prednosti recikliranja su brojne, od smanjenja emisija CO₂ do uštede energije i prirodnih resursa, stoga je potrebno primijeniti ga gdje god je to moguće. [13, 19]

Posljednjih godina su trošak, dostupnost, sigurnost opskrbe i klimatski utjecaji upotrebe energije nagnali znanstvenike i inženjere da rade na razvoju kalkulatora energije. Bez takvih kalkulatora teško je razumjeti prave troškove energije podzemne infrastrukture. Učinkovitije ili alternativne metode iskopavanja materijala ili proizvodnje betona mogu u konačnici rezultirati većom energetsom učinkovitošću tijekom izgradnje. Korištenje podzemnog prostora zahtijeva značajne količine energije za ventilaciju, kontrolu temperature, rasvjetu, sigurnosne uređaje i druge sustave u eksploataciji. Tako se danas umjesto klasičnih rasvjetnih tijela ugrađuju svjetiljke s manjom potrošnjom energije koje se odražavaju i na sigurnost putnika u tunelu. Led rasvjeta ima izrazito visoki stupanj jednolikosti rasvjetljenosti i nizak faktor bliještanja, a troškovi održavanja ovakvih rasvjetnih tijela bitno su smanjeni (slika 34.). [13]



Slika 34: Led rasvjeta tunela [30]

8.3. Gospodarenje građevinskim otpadom

Održiva gradnja podrazumijeva i zbrinjavanje građevinskog otpada nastalog tijekom izgradnje objekta. Iako reciklirani materijali uvelike doprinose smanjenju građevinskog otpada, on i dalje nije nestao u potpunosti. Građevinski otpad podrazumijeva otpad nastao prilikom gradnje, rekonstrukcije, uklanjanja ili održavanja postojeće građevine, te otpad nastao od iskopanog materijala koji se bez prethodne uporabe ne može koristiti za građenje građevine zbog koje je nastao. Gospodarenje njime podrazumijeva skup aktivnosti i mjera koje obuhvaćaju odvojeno skupljanje, uporabu i/ili zbrinjavanje otpada, te se isti ne smije odložiti na mjestu nastanka kao ni na lokacijama koje nisu za to predviđene. Posjednik građevinskog otpada je dužan osigurati uvjete za odvojeno skupljanje i privremeno skladištenje građevinskog otpada ili ih povjeriti ovlaštenoj osobi. Ovlaštena osoba obavlja djelatnost gospodarenje građevinskim otpadom u reciklažnom dvorištu ili na gradilištu pomoću mobilnog uređaja. Neke vrste građevinskog otpada moguće je ponovo upotrijebiti,

poput miješanog asfalt-betona koji se potom koristi za nevezane gornje i donje nosive slojeve ceste ili za izgradnju poljoprivrednih puteva. U Hrvatskoj se godišnje proizvede više od 2 milijuna tona građevinskog otpada, a samo se 5-10% reciklira ili zbrinjava na propisan način, dok ostatak nerijetko završi na divljim odlagalištima. [29]

9. ZAKLJUČAK

Sastavni dio tunelogradnje, kao i svakog inženjerskog zahvata, posebice u geotehnici jesu mogući hazardi. Kao budući inženjeri važno je da sagledamo sve potencijalne rizike i damo konstruktivno rješenje za svaki od njih. Gradnjom u stijenskoj masi javljaju se brojni problemi kao posljedica nesigurnosti koje vezujemo uz prirodu materijala, klasifikacijske sustave, empirijske izraze, odabir parametara koji su reprezentativni za šire područje, modele koji opisuju stvarnost itd. Brojne klasifikacije uopće ne sadrže nove tipove podgrada ili sustave ojačanja. Potrebno je kontinuirano unaprjeđenje klasifikacijskih sustava i empirijskih izraza koji se koriste za opisivanje ponašanja stijenske mase kako bi se nesigurnosti svele na minimum. Detaljno provedenim istražnim radovima prije početka gradnje, koji pružaju informacije o podzemnoj vodi i sastavu terena u kojem se gradi, moguće je umanjiti hazard u tunelogradnji tijekom i nakon iskopa te prilikom korištenja.

Tunelogradnja u kršu izrazito je složena, a prije gradnje svakako je potrebno istražiti sve krške fenomene. Nepovoljna strukturna geologija i nedovoljna geološka istraživanja često rezultiraju hazardnim događajima. Potrebno je poštovati pravila struke i na vrijeme reagirati ukoliko dođe do neočekivanih promjena u ponašanju tunelske podgrade. U tome uvelike pomaže korištenje metode opažanja.

Stvarne opasnosti i rizici za ljude u podzemlju postoje, a pravilnim projektiranjem, građenjem i održavanjem oni se svode na minimum. Postoje razni standardi i propisi koji reguliraju sigurnost podzemlja i time brinu o zdravlju i sigurnosti svih korisnika podzemnih objekata. U skladu s razvojem i potrebama današnje podzemne gradnje, propisi vezani uz sigurnost postaju sve stroži. Razvoj podzemne infrastrukture pruža mogućnost za učinkovitije korištenje raspoloživog urbanog prostora, ali pritom zahtijeva značajne investicijske troškove u usporedbi s površinskom infrastrukturom. Ograničena financiranja i ciljevi troškova često su kritični zahtjevi za provedbu projekta te je potrebna analiza svih faktora koji utječu na troškove.

Podzemne građevine sve češće se grade iz razloga što se u velikim gradovima uvidjelo kako je površinski prostor prenapučen, premalo je zelenih površina, a velika je prisutnost betonizacije i zagađenja zraka. Dobro planirana i funkcionalna podzemna infrastruktura može poboljšati kvalitetu života i održivost više nego bilo koja na površini. Održiva gradnja tunela podrazumijeva upotrebu ekološki prihvatljivijih građevinskih materijala, reduciranje potrošnje energije, recikliranje i zbrinjavanje građevinskog otpada.

POPIS LITERATURE

- [1] Dugonjić Jovančević, S., Interna skripta iz kolegija Mehanika tla i stijena, Građevinski fakultet Rijeka, Rijeka, 2019.
- [2] Počekal, N.: Uporaba stijenskog materijala u graditeljstvu, <https://docplayer.net/92359650-1-uvod-intaktna-stijena-fizikalna-svojstva-intaktne-stijene-stijenska-masa-15.html>, pristup 12.08.2020.
- [3] International Tunneling and Underground apace association: Recommendations od development process for mined tunnels, ITA report, SAD, 2016.
- [4] Singh, B., Goel, R.K., Rock mass classification: a practical approach in civil engineering, Elsevier, Oxford, 1999.
- [5] Bieniawski, Z.T., Engineering Classification od Jointed Rock Masses, Trans S. Arf. Inst. Civ. Engrs, 1973.
- [6] Brežnjak, T.: Klasifikacije stijenskih masa, <https://repozitorij.gfv.unizg.hr/islandora/object/gfv%3A491/datastream/PDF/view>, pristup 14.08.2020.
- [7] Hoek, E., Stenhght of Rock and Rock Masses, ISRM New Journal, Vol 2 (2)., 1994.
- [8] Fine Softwear: GE05 MKE – Tuneli, <https://www.finesoftware.hr/geotechnical-software/fem-tunnel/>, pristup 25.08.2020.
- [9] Wikipedia: Poplave, <https://hr.wikipedia.org/wiki/Poplava>, pristup 12.08.2020.
- [10] Jagodnik, P., Interna skripta iz kolegija Primjenjena geologija, Građevinski fakultet Rijeka, Rijeka, 2019.
- [11] Hrvatski geološki institut: Osnovna hidrogeološka karta Republike Hrvatske 1:100000, <https://www.hgi-cgs.hr/Osnovna-hidrogeoloska-karta-Republike-Hrvatske.htm>, pristup 12.08.2020.
- [12] Singh, B., Goel, R.K.: Engineering rock mass classification, 2011.
- [13] The National Research Council, Underground Engineering for Sustainable Urban Development, The National Academies Press, Washington, 2013.
- [14] Institut građevinarstva Hrvatske, Opći tehnički uvjeti za radove na cestama, Knjiga V – Cestovni tuneli, Hrvatske ceste, 2001.
- [15] Vrkljan, I., Iskustva tunelogradnje u dinarskom kršu, Institut IGH d.d., Zagreb, 2012.
- [16] Stabilizacija svoda kaverne u tunelu Učka, Saopćenje 5 Jugoslavenskog simpozija iz mehanike stijena i podzemnih radova, knjiga 2, Split, 1980.

- [17] Božićević, S., Otkrivanje i proučavanje šupljina pod građevinama u kršu, Mehanika stijena, temeljenje, podzemni radovi, Društvo građ. inž. i teh. Zagreb, knjiga 1, Zagreb, 1983.
- [18] Valut remedy of the caving object in tunnel Vrata, In: Rock Enigneering in Difficult Ground Conditions – Soft Rocks and Karst, Taylor&Francis Group, London, 2010.
- [19] Dugonjić Jovančević, S., Interna skripta iz kolegija Geotehničkog inženjerstva, Građevinski fakultet Rijeka, Rijeka, 2020.
- [20] Kolymbas, D., Tunelling and Tunnel Mechanics: A Rational Approachto Tunneling, Springer,437 p, 2005.
- [21] Pravilnik o minimalnim sigurnosnim zahtjevima za tunele, NN 96/13, <http://www.propisi.hr/print.php?id=9658>, pristup 7.07.2020.
- [22] Vrkljan, I.: Provjetravanje, rasvjeta i opasnost od požara, <https://www.scribd.com/doc/264913911/14-Provjetravanje-Rasvjeta-Opasnost-Od-Pozara>, pristup 28.08.2020.
- [23] Drakulić, M: Operativna strategija uzdužne reverzibilne ventilacije tunela u uvjetima požara, http://www.hkis.hr/Upload/Documents/Vijesti/2_Operativna_strategija_ventilacija_Drakulic%87.pdf, pristup 6.07.2020.
- [24] Pačelat, R., Zorić., Z., Istraživanje uzorka požara, ZIRS, Zagreb, 2003.
- [25] Katalinić., M., Preventivne mjere sigurnosti i zaštite od požara u cestovnim tunelima, Veleučiliste u Karlovcu, Karlovac, 2016.
- [26] ScienceDirect: Tunnelling and Underground Space Technology, <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0886779815303746>, pristup 7.07.2020.
- [27] Višnjjić, V., Pušić, M., Grgurević, I.: Analiza razvoja požara u cestovnim tunelima, file:///C:/Users/Korisnik/Downloads/530218.HZDP_Opatija_2011_Vinji_Pui_Grgurevi_final.pdf, pristup 7.07.2020.
- [28] Krebs+Kiefer: Cestovni tuneli, <https://www.kuk.de/projekte/verkehrsanlagen/detail/Projekte/show/strassentunnel.html>, pristup 6.07.2020.
- [29] Dugonjić Jovančević, S., Interna skripta iz kolegija Zaštita okoliša, Građevinski fakultet Rijeka, Rijeka, 2020.
- [30] Detas Grupa: Led rasvjeta tunela, <https://www.detas.hr/blog/portfolio-item/led-rasvjeta-tunela/>, pristup 14.07.2020.